

Capítulo 2

Psicrometria

Prof. João Pimenta



Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica



Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração

Este material foi desenvolvido pelo Prof. João Pimenta, para aulas na disciplina obrigatória de graduação em engenharia mecânica Instalações Termomecânicas II (Ar condicionado).

Para fazer referência a este material, por favor utilize o seguinte :

PIMENTA, João. Ar Condicionado: Psicrometria. Agosto a Dezembro de 2009. 123 slides. Notas de Aula. Apresentação MS PowerPoint.

Críticas, comentários, sugestões, etc. para
pimenta@unb.br

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia
ENM - Departamento de Engenharia Mecânica
Brasília, Agosto-2009

Conteúdo

1. Introdução

2. Parâmetros Psicrométricos

3. A Carta Psicrométrica

4. A Transferência de Calor e Massa

5. Saturação Adiabática e a Temperatura de Bulbo Úmido

6. Processos Básicos de Condicionamento do Ar

1 Introdução



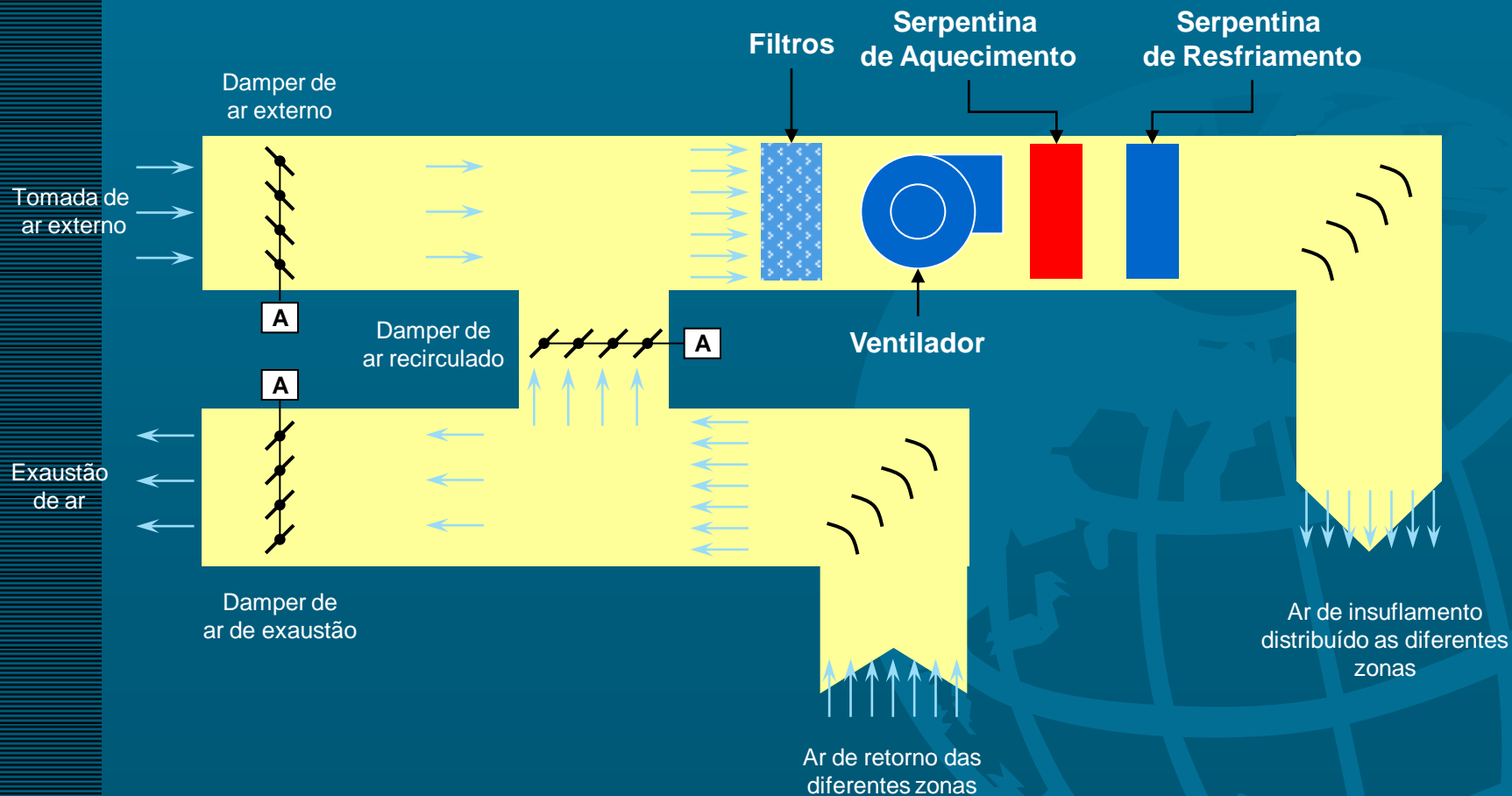
Havíamos definido o AC como,

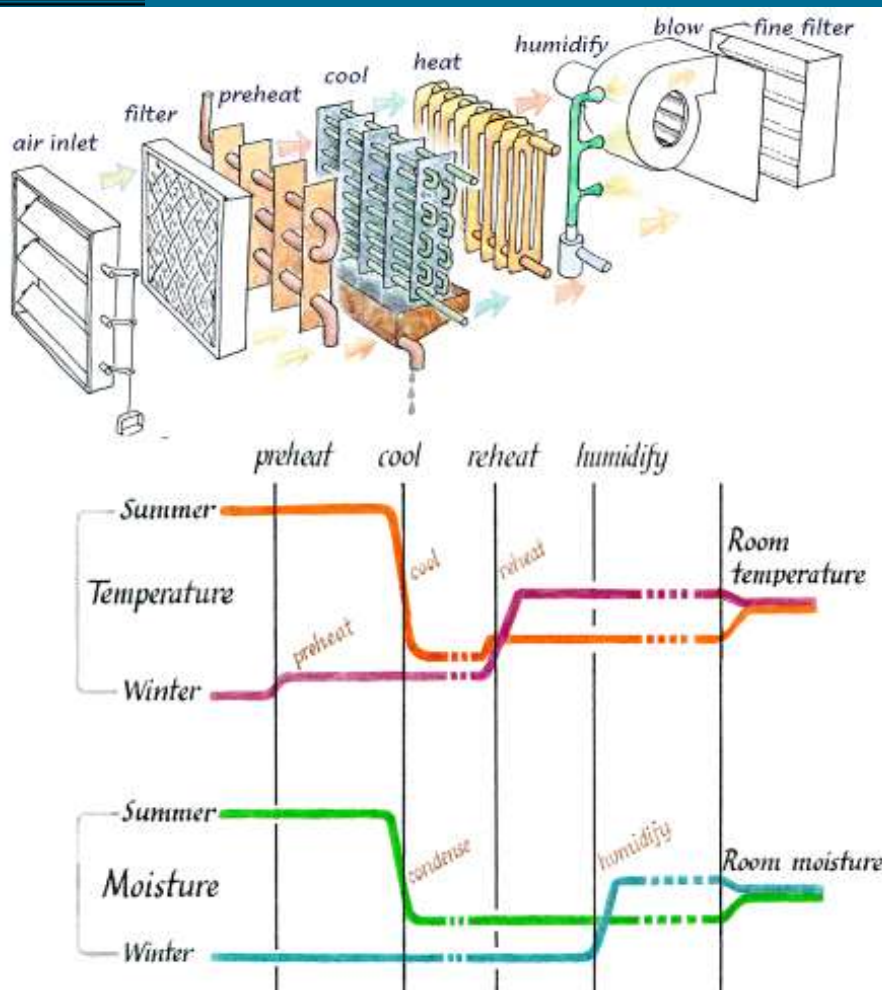
“Processo de tratamento do ar, que através do ajuste simultâneo de temperatura, umidade, grau de pureza e circulação, permite manter condições desejáveis para um espaço climatizado”

Vimos também que tal definição implica nas seguintes 4 funções básicas:

- Controle da temperatura;
- Controle da umidade;
- Filtragem, limpeza e renovação do ar;
- Movimentação e circulação do ar.

A figura a seguir ilustra esquematicamente um sistema de AC que incorpora essas funções ...





A análise dos diferentes processos envolvendo o ar atmosférico é realizada com o auxílio da PSICROMETRIA.

PSICROMETRIA.

Estudo das propriedades termodinâmicas do ar úmido afim de analisar mudanças de estado do mesmo.

Ar Atmosférico X Ar seco X Ar Úmido

O ar atmosférico contém vários componentes gasosos, bem como vapor d'água e contaminantes (particulados, pólen, etc.)

O ar seco existe quando todo o vapor d'água e contaminantes são removidos do ar atmosférico.

Nitrogênio	78,08400	%
Oxigênio	20,94760	%
Argônio	0,93400	%
Dióxido de carbono	0,03140	%
Néon	0,00182	%
Hélio	0,00052	%
Metano	0,00015	%
Dióxido de Enxofre	0 a 0,0001	%
Hidrogênio	0,00005	%
Outros (Criptônio, Xenônio, Ozônio, etc.)	0,00002	%

Ar Atmosférico X Ar seco X Ar Úmido

O ar úmido é considerado com uma mistura binária (2 componentes) de ar seco e vapor d'água.

A quantidade de vapor d'água no ar úmido varia entre Zero (ar seco) e um máximo que depende da pressão e temperatura da mistura.



Saturação

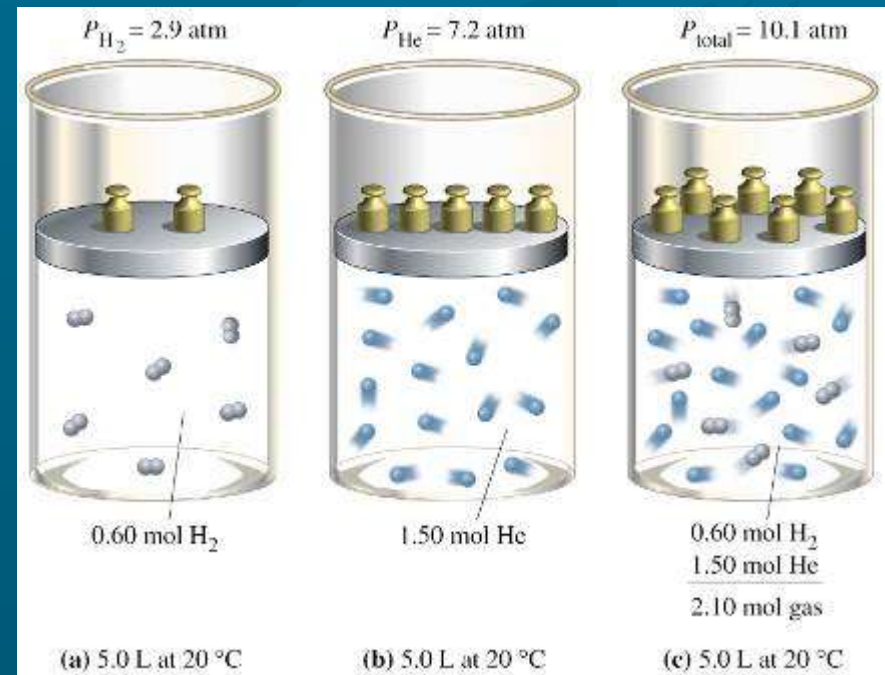
{ Estado de equilíbrio entre o ar úmido e a fase condensada (líquido ou sólida)

Lei de Dalton

Lei da mistura de gases perfeitos observada por John Dalton estabelece que ...

A pressão total da mistura, P , é igual a soma das pressões P_i que cada gás exerceria se ocupasse isoladamente o volume do reservatório, V , que contém a mistura e estivesse a temperatura, T da mistura.

$$P = P_a + P_w$$



<http://www.kentchemistry.com/links/GasLaws/dalton.htm>

Massas Moleculares

A massa molecular do ar seco é de 28,9645 sendo a constante do gás para o ar seco de,

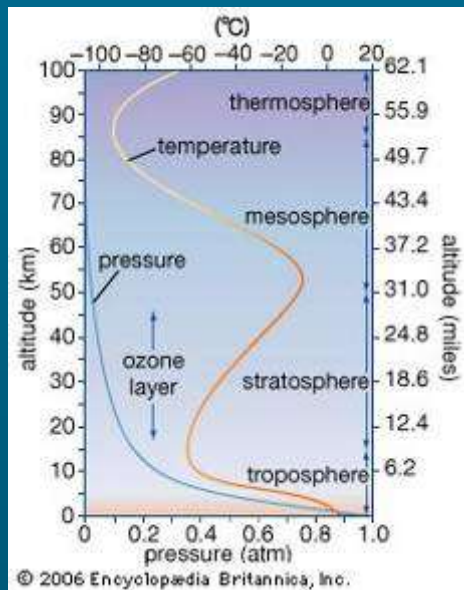
$$R_a = \frac{8314,41}{28,9645} = 287,055 \frac{J}{kg.K}$$

A massa molecular relativa da água é de 18,01528 sendo a constante do gás para o vapor d'água de,

$$R_w = \frac{8314,41}{18,01528} = 461,520 \frac{J}{kg.K}$$

Variação da Temperatura e Pressão na atmosfera.

O temperatura e pressão do ar atmosférico variam consideravelmente com a altitude, e também com a posição geográfica e as condições meteorológicas.

**Dados Atmosféricos Padrão (NASA, 1976)**

Altitude [m]	Temperatura [oC]	Pressão [kPa]
-500	18,2	107,478
0	15,0	101,325
500	11,8	95,461
1000	8,5	89,874
2000	2,0	79,495
3000	-4,5	70,108
4000	-11,0	61,640
5000	-17,5	54,020
6000	-24,0	47,181
7000	-30,5	41,061
8000	-37,0	35,600
9000	-43,5	30,742
10000	-50,0	26,436

$$P = 101,325 \left(1 - 2,25577 \times 10^{-5} \cdot h\right)^{5,2559}$$

$$h \rightarrow -500m < altitude < 11000m$$

Tabelas de vapor d'água saturado

T °C	Volume Especifica				Entalpia Especifica				T °C
	P kPa	m³/Kg v _g	v _{fg}	v _f	h _g	h _{fg}	h _f		
0,01	0,6113	0,00100	206,14	206,14	0,01	2501,4	2501,4	0,01	
5	0,8721	0,00100	147,12	147,12	20,98	2489,6	2510,6	5	
10	1,2276	0,00100	106,38	106,38	42,01	2477,8	2519,8	10	
15	1,7051	0,00100	77,93	77,93	62,99	2465,9	2528,9	15	
20	2,339	0,00100	57,79	57,79	83,96	2454,1	2538,1	20	
25	3,169	0,00100	43,36	43,36	104,89	2442,3	2547,2	25	
30	4,246	0,00100	32,89	32,89	125,79	2430,5	2556,3	30	
35	5,628	0,00101	25,22	25,22	146,68	2418,6	2565,3	35	
40	7,384	0,00101	19,52	19,52	167,57	2406,7	2574,3	40	
45	9,593	0,00101	15,26	15,26	188,45	2394,8	2583,2	45	
50	12,349	0,00101	12,03	12,03	209,33	2382,8	2592,1	50	
55	15,758	0,00101	9,567	9,568	230,23	2370,7	2600,9	55	
60	19,94	0,00102	7,670	7,671	251,13	2358,5	2609,6	60	
65	25,03	0,00102	6,196	6,197	272,06	2346,2	2618,3	65	
70	31,19	0,00102	5,041	5,042	292,98	2333,8	2626,8	70	
75	38,58	0,00103	4,130	4,131	313,93	2321,4	2635,3	75	
80	47,39	0,00103	3,406	3,407	334,91	2308,8	2643,7	80	
85	57,83	0,00103	2,827	2,828	355,90	2296,0	2651,9	85	
90	70,14	0,00104	2,360	2,361	376,92	2283,2	2660,1	90	
95	84,55	0,00104	1,981	1,982	397,96	2270,1	2668,1	95	
100	101,325	0,00104	1,672	1,6729	419,04	2257,1	2676,1	100	
105	120,82	0,00105	1,418	1,4194	440,15	2243,7	2683,8	105	
110	143,27	0,00105	1,209	1,2102	461,30	2230,2	2691,5	110	
115	169,06	0,00106	1,036	1,0366	482,48	2216,5	2699,0	115	
120	198,53	0,00106	0,891	0,8919	503,71	2202,6	2706,3	120	
125	232,1	0,00107	0,770	0,7706	524,99	2188,5	2713,5	125	
130	270,1	0,00107	0,667	0,6685	546,31	2174,2	2720,5	130	
135	313,0	0,00108	0,581	0,5822	567,59	2159,7	2727,3	135	
140	361,3	0,00108	0,508	0,5089	589,13	2144,8	2733,9	140	
145	415,4	0,00109	0,445	0,4463	610,63	2129,7	2740,3	145	
150	475,8	0,00109	0,392	0,3928	632,20	2114,3	2746,5	150	
155	543,1	0,00110	0,346	0,3468	653,84	2098,6	2752,4	155	
160	617,8	0,00110	0,306	0,3071	675,55	2082,6	2758,1	160	
165	700,5	0,00111	0,272	0,2727	697,34	2066,2	2763,5	165	
170	791,7	0,00111	0,242	0,2428	719,21	2049,5	2768,7	170	
175	892,0	0,00112	0,216	0,2168	741,17	2032,4	2773,6	175	
180	1002,1	0,00113	0,193	0,1941	763,22	2015,0	2778,2	180	
185	1122,7	0,00113	0,173	0,1741	785,37	1997,0	2782,4	185	
190	1254,4	0,00114	0,155	0,1563	807,62	1978,8	2786,4	190	
195	1397,8	0,00115	0,140	0,1411	829,98	1960,0	2790,0	195	
200	1553,8	0,00116	0,126	0,1274	852,45	1940,8	2793,2	200	


Entrada
em
Temperatura

P kPa	Volume Especifica				Entalpia Especifica				P kPa
	T °C	m³/kg v _g	v _{LG}	v _f	h _g kJ/kg	h _{LG}	h _f		
0,6113	0,01	0,00100	206,14	206,14	0,01	2501,4	2501,4	0,6113	
1	6,98	0,00100	129,21	129,21	29,30	2484,9	2514,2	1	
2	17,50	0,00100	67,00	67,00	73,48	2460,0	2533,5	2	
3	24,08	0,00100	45,67	45,67	101,05	2444,2	2545,2	3	
4	28,96	0,00100	34,80	34,80	121,46	2432,9	2554,4	4	
5	32,88	0,00101	28,19	28,19	153,82	2421,7	2561,5	5	
10	45,81	0,00101	14,67	14,67	191,83	2392,9	2584,7	10	
15	52,97	0,00101	10,02	10,02	225,94	2375,2	2599,1	15	
20	60,06	0,00102	7,648	7,649	251,40	2358,7	2609,7	20	
30	69,10	0,00102	5,228	5,229	289,23	2336,1	2625,3	30	
40	75,87	0,00103	3,997	3,999	317,58	2319,2	2636,8	40	
50	81,33	0,00103	3,239	3,240	340,49	2305,4	2645,9	50	
100	99,63	0,00104	1,6930	1,6940	417,46	2258,0	2675,5	100	
101,325	100,00	0,00104	1,6719	1,6729	419,04	2257,1	2676,1	101,325	
150	111,37	0,00105	1,1583	1,1593	467,11	2206,5	2693,6	150	
200	120,23	0,00106	0,8846	0,8857	504,70	2202,0	2706,7	200	
250	127,44	0,00107	0,7176	0,7187	535,37	2181,5	2716,9	250	
300	132,55	0,00107	0,6047	0,6058	561,47	2163,8	2725,3	300	
350	138,88	0,00108	0,5231	0,5243	584,33	2148,1	2732,4	350	
400	143,63	0,00108	0,4614	0,4625	604,74	2129,1	2733,8	400	
450	147,93	0,00109	0,4129	0,4140	623,25	2107,5	2730,7	450	
500	151,86	0,00109	0,3738	0,3749	640,23	2108,5	2748,7	500	
600	158,85	0,00110	0,3146	0,3157	670,56	2086,2	2756,8	600	
700	164,97	0,00111	0,2718	0,2729	697,22	2066,3	2763,5	700	
800	170,43	0,00112	0,2393	0,2404	721,11	2048,0	2769,1	800	
900	175,38	0,00112	0,2139	0,2150	742,83	2031,1	2773,9	900	
1000	179,91	0,00113	0,1933	0,1944	762,81	2015,1	2778,1	1000	
1100	184,09	0,00113	0,1764	0,1775	781,34	2000,4	2781,7	1100	
1200	187,99	0,00114	0,1622	0,1633	798,65	1986,2	2784,8	1200	
1300	191,64	0,00114	0,1502	0,1513	814,93	1972,7	2787,6	1300	
1400	195,07	0,00115	0,1389	0,1401	830,30	1959,7	2790,0	1400	
1500	198,32	0,00115	0,1306	0,1318	844,89	1947,3	2792,2	1500	
2000	212,42	0,00118	0,0984	0,0996	908,79	1890,7	2799,5	2000	
2500	223,99	0,00120	0,0788	0,0800	962,11	1841,0	2803,1	2500	
3000	233,90	0,00122	0,0655	0,0667	1008,42	1795,8	2804,2	3000	
4000	250,40	0,00125	0,0486	0,0498	1067,11	1714,1	2801,4	4000	
5000	263,99	0,00129	0,0381	0,0394	1154,23	1640,1	2794,3	5000	
10000	311,06	0,00145	0,01658	0,01803	1407,56	1311,1	2724,7	10000	
20000	365,81	0,002036	0,001898	0,005934	1826,3	583,4	2409,7	20000	
22090	374,14	0,003155	0	0,003155	2099,3	0	2099,3	22090	

Entrada
em
Pressão

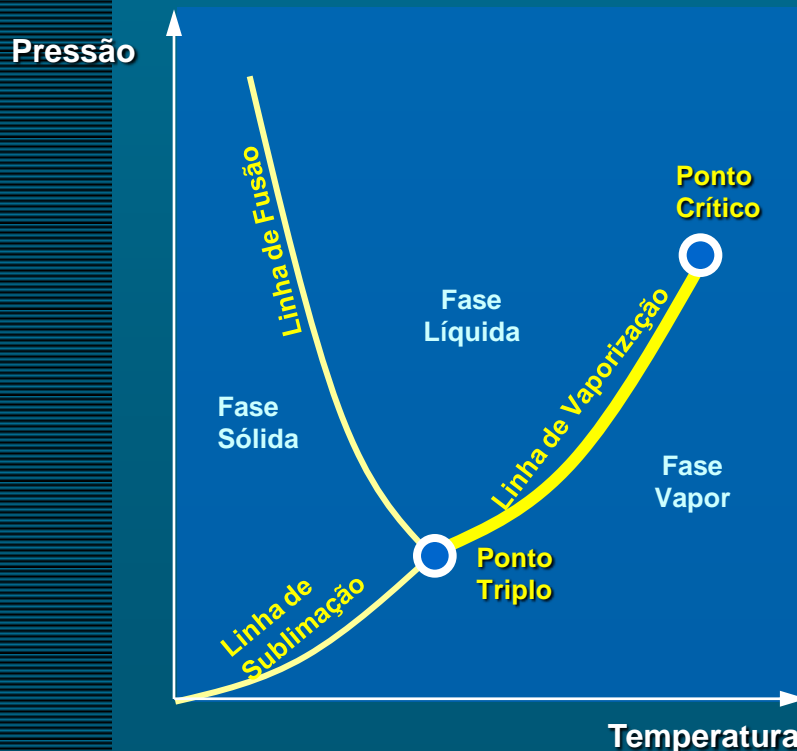
2

Parâmetros Psicrométricos



A Linha de Saturação

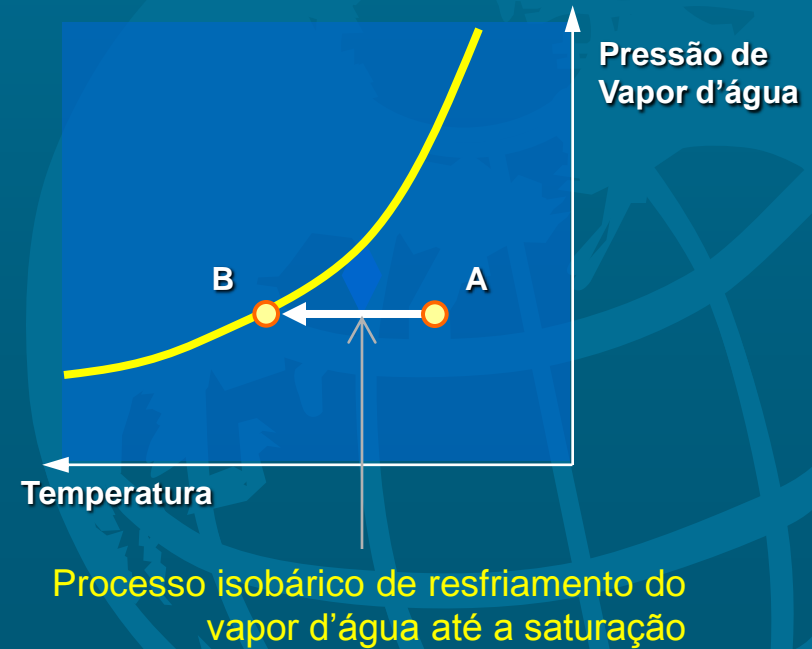
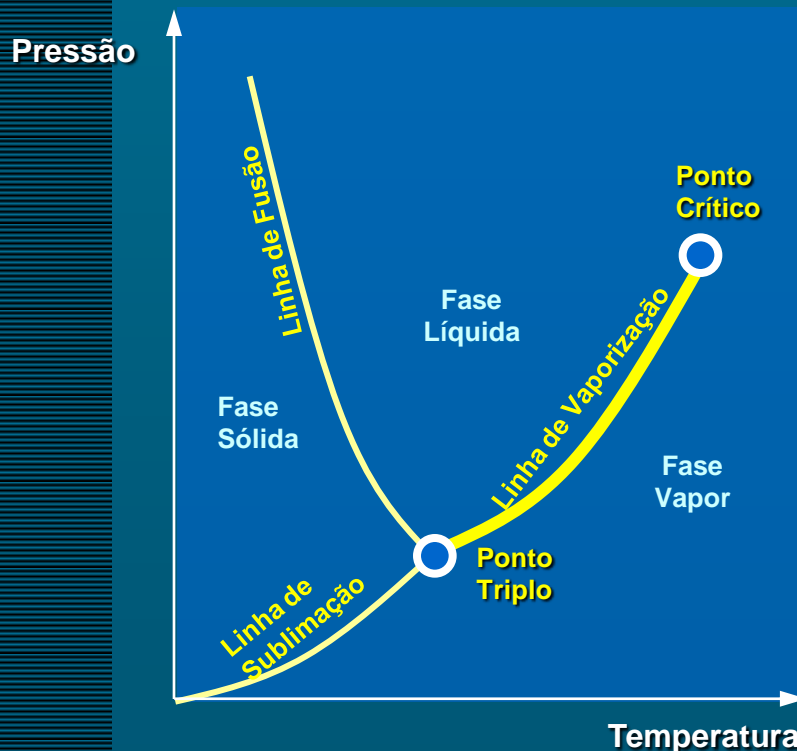
Sabemos da termodinâmica que o domínio das diferentes fases (sólido, líquido e vapor) de uma dada substância pura pode ser representado num plano pressão temperatura como abaixo...



Em nosso estudo estaremos particularmente interessados com a linha de saturação (vaporização) que delimita as regiões de líquido e vapor

A Linha de Saturação

A região a direita dessa linha de saturação diz respeito ao vapor d'água superaquecido, tal qual o mesmo se encontra no ar úmido.



A Linha de Saturação

As colocações anteriores são válidas para o vapor d'água (substância pura)!

Qual seria o efeito se considerarmos a mistura vapor d'água + ar seco (ar úmido) ???

Resposta: Nenhum! O vapor d'água não é influenciado pela presença do ar

→na verdade, uma pequena interação molecular ocorre que pode ser considerada desprezível para fins práticos.

Sobre a linha de saturação o ar é dito saturado → qualquer redução adicional de temperatura causa a condensação do vapor d'água presente no ar.

Relações do Gás Perfeito

Quando o ar úmido é considerado uma mistura de gases perfeitos independentes (ar seco + vapor d'água), temos:

$$\text{para o ar seco} \rightarrow p_a V = n_a R.T$$

$$\text{para o vapor d'água} \rightarrow p_w V = n_w R.T$$

onde,

p_a → pressão parcial do ar seco

p_w → pressão parcial do vapor d'água

V → volume total da mistura

n_a → número de moles de ar seco

n_w → número de moles de vapor d'água

R → constante universal dos gases (8314,4 kJ/kg.mol.K)

T → temperatura absoluta [K]

Relações do Gás Perfeito

Por sua vez, para a mistura ar seco + vapor d'água, também deve obedecer a equação do gás perfeito...

$$pV = nR.T$$

ou seja,

$$(p_a + p_w).V = (n_a + n_w)R.T$$

sendo,

$$p = p_a + p_w$$

$$n = n_a + n_w$$

Com essas equações, as frações molares de ar seco e vapor d'água podem ser dadas como,

$$x_a = \frac{p_a}{(p_a + p_w)} = \frac{p_a}{p}$$

$$x_w = \frac{p_w}{(p_a + p_w)} = \frac{p_w}{p}$$

Uma série de parâmetros psicrométricos é utilizada para a caracterização do estado termodinâmico do ar úmido...

- Umidade Absoluta
- Umidade Relativa
- Grau de Saturação
- Volume Específico
- Entalpia Específica
- Calor Específico a Pressão Constante
- Temperatura de Bulbo Seco
- Temperatura de Orvalho
- Temperatura de Bulbo Úmido

2. Parâmetros Psicrométricos

Tabela C.1 – Umidade absoluta e outras propriedades relevantes do ar úmido saturado. Pressão normal (101,325 kPa). Cont...

T	Umid. Abs.	Volume Especifico				Entalpia Especifica				Pressão de Vapor		T							
°C	g/kg ar seco	m³/kg ar seco	h	v ar sat.	h ar seco	Δh	h ar sat.	Δh	h ar sat.	kPa	°C								
-10	0,001606	0,7450	0,0019	0,7469	-10,058	3,983	-6,072	0,2399	-10	40	0,049138	0,8870	0,0698	0,9568	40,253	126,420	166,673	7,3834	40
-9	0,001755	0,7478	0,0021	0,7499	-9,052	4,358	-4,694	0,2839	-9	41	0,052045	0,8898	0,0741	0,9640	41,260	133,995	175,255	7,7863	41
-8	0,001917	0,7507	0,0023	0,7530	-8,046	4,763	-3,284	0,3100	-8	42	0,055117	0,8927	0,0788	0,9714	42,268	142,001	184,269	8,2080	42
-7	0,002092	0,7535	0,0025	0,7560	-7,041	5,201	-1,839	0,3382	-7	43	0,058361	0,8955	0,0837	0,9792	43,275	150,463	193,738	8,6491	43
-6	0,002281	0,7563	0,0028	0,7591	-6,035	5,677	-0,358	0,3687	-6	44	0,061788	0,8984	0,0888	0,9872	44,282	159,408	203,690	9,1106	44
-5	0,002486	0,7592	0,0030	0,7622	-5,029	6,190	1,163	0,4018	-5	45	0,065408	0,9012	0,0943	0,9955	45,289	168,865	214,155	9,5932	45
-4	0,002708	0,7620	0,0033	0,7653	-4,023	6,750	2,727	0,4375	-4	46	0,069214	0,9040	0,1002	1,0042	46,296	178,866	225,163	10,0976	46
-3	0,002948	0,7649	0,0036	0,7685	-3,017	7,353	4,336	0,4761	-3	47	0,073277	0,9069	0,1063	1,0132	47,304	189,444	236,747	10,6246	47
-2	0,003207	0,7677	0,0040	0,7717	-2,012	8,006	5,994	0,5177	-2	48	0,077552	0,9097	0,1129	1,0226	48,311	200,633	248,944	11,1751	48
-1	0,003487	0,7706	0,0043	0,7749	-1,006	8,711	7,766	0,5627	-1	49	0,082072	0,9126	0,1198	1,0323	49,319	212,472	261,791	11,7498	49
0	0,003789	0,7734	0,0047	0,7781	0,000	9,473	9,673	0,6112	0	50	0,086853	0,9154	0,1272	1,0425	50,326	225,004	275,330	12,3498	50
1	0,004076	0,7762	0,0051	0,7813	1,006	10,106	11,202	0,6571	1	51	0,091913	0,9182	0,1350	1,0532	51,334	238,274	289,608	12,9759	51
2	0,004381	0,7791	0,0055	0,7848	2,012	10,968	12,960	0,7060	2	52	0,097268	0,9211	0,1433	1,0643	52,341	252,329	304,670	13,6289	52
3	0,004707	0,7819	0,0059	0,7878	3,018	11,792	14,810	0,7580	3	53	0,102939	0,9239	0,1521	1,0760	53,349	267,223	320,572	14,3100	53
4	0,005054	0,7848	0,0064	0,7911	4,023	12,671	16,694	0,8135	4	54	0,108947	0,9267	0,1614	1,0882	54,357	283,011	337,568	15,0198	54
5	0,005424	0,7876	0,0069	0,7945	5,029	13,608	18,638	0,8725	5	55	0,115315	0,9296	0,1713	1,1009	55,365	299,758	355,122	15,7597	55
6	0,005817	0,7904	0,0074	0,7978	6,035	14,607	20,642	0,9352	6	56	0,122069	0,9324	0,1819	1,1143	56,373	317,528	373,901	16,5304	56
7	0,006236	0,7933	0,0079	0,8012	7,041	15,671	22,712	1,0020	7	57	0,129236	0,9353	0,1932	1,1284	57,380	336,397	393,777	17,3330	57
8	0,006682	0,7961	0,0085	0,8047	8,047	16,804	24,851	1,0728	8	58	0,136846	0,9381	0,2051	1,1432	58,388	356,446	414,835	18,1688	58
9	0,007157	0,7990	0,0092	0,8081	9,053	18,009	27,062	1,1481	9	59	0,144933	0,9409	0,2179	1,1588	59,397	377,764	437,060	19,0386	59
10	0,007663	0,8018	0,0099	0,8117	10,059	19,292	29,351	1,2280	10	60	0,153532	0,9438	0,2315	1,1752	60,405	400,445	460,850	19,9437	60
11	0,008197	0,8046	0,0106	0,8152	11,065	20,656	31,721	1,3127	11	61	0,162684	0,9466	0,2460	1,1926	61,413	424,601	486,014	20,8852	61
12	0,008766	0,8075	0,0114	0,8188	12,071	22,106	34,177	1,4026	12	62	0,172433	0,9495	0,2614	1,2109	62,421	450,346	512,767	21,8642	62
13	0,009370	0,8103	0,0122	0,8225	13,077	23,647	36,724	1,4978	13	63	0,182828	0,9523	0,2780	1,2303	63,429	477,813	541,243	22,8820	63
14	0,009901	0,8132	0,0131	0,8262	14,083	25,283	39,367	1,5987	14	64	0,193923	0,9551	0,2957	1,2508	64,438	507,146	571,583	23,9397	64
15	0,010461	0,8160	0,0140	0,8300	15,090	27,021	42,111	1,7054	15	65	0,205778	0,9580	0,3146	1,2726	65,446	538,507	603,953	25,0386	65
16	0,011043	0,8188	0,0150	0,8338	16,096	28,866	44,961	1,8184	16	66	0,218463	0,9608	0,3350	1,2958	66,455	572,081	638,536	26,1802	66
17	0,011638	0,8217	0,0160	0,8377	17,103	30,823	47,924	1,9379	17	67	0,232051	0,9636	0,3568	1,3204	67,463	608,066	675,527	27,3654	67
18	0,012248	0,8245	0,0172	0,8417	18,108	32,898	51,006	2,0643	18	68	0,246628	0,9665	0,3803	1,3467	68,472	646,687	715,158	28,5958	68
19	0,012867	0,8274	0,0184	0,8457	19,114	35,099	54,213	2,1978	19	69	0,262291	0,9693	0,4055	1,3748	69,481	688,210	757,691	29,8729	69
20	0,013477	0,8302	0,0196	0,8498	20,121	37,432	57,553	2,3388	20	70	0,279149	0,9722	0,4328	1,4049	70,489	732,922	803,411	31,1978	70
21	0,014070	0,8330	0,0210	0,8540	21,127	39,905	61,032	2,4877	21	71	0,297324	0,9750	0,4622	1,4372	71,498	781,152	852,650	32,5721	71
22	0,014670	0,8359	0,0224	0,8583	22,133	42,524	64,657	2,6447	22	72	0,316958	0,9778	0,4941	1,4719	72,507	833,279	905,786	33,9971	72
23	0,015279	0,8387	0,0240	0,8627	23,140	45,298	68,437	2,8104	23	73	0,338177	0,9807	0,5286	1,5093	73,516	889,747	963,263	35,4746	73
24	0,015891	0,8416	0,0256	0,8671	24,146	48,235	72,381	2,9851	24	74	0,361283	0,9835	0,5662	1,5492	74,525	951,041	1025,566	37,0057	74
25	0,016509	0,8444	0,0273	0,8717	25,152	51,344	76,496	3,1682	25	75	0,386375	0,9863	0,6072	1,5935	75,534	1017,754	1093,288	38,5922	75
26	0,017146	0,8473	0,0291	0,8764	26,159	54,635	80,793	3,3611	26	76	0,413750	0,9892	0,6519	1,6411	76,543	1090,566	1167,109	40,2358	76
27	0,017797	0,8501	0,0311	0,8811	27,165	58,116	85,282	3,5673	27	77	0,443701	0,9920	0,7010	1,6930	77,552	1170,263	1247,815	41,9377	77
28	0,018425	0,8529	0,0331	0,8860	28,172	61,800	89,972	3,7822	28	78	0,476586	0,9948	0,7549	1,7498	78,562	1257,803	1336,365	43,7000	78
29	0,019073	0,8558	0,0353	0,8911	29,178	65,696	94,874	4,0083	29	79	0,512816	0,9977	0,8144	1,8121	79,572	1354,286	1433,858	45,5240	79
30	0,019728	0,8586	0,0376	0,8962	30,185	69,836	100,001	4,2460	30	80	0,552894	1,0005	0,8804	1,8809	80,581	1461,060	1541,641	47,4113	80
31	0,020391	0,8614	0,0400	0,9013	31,192	74,172	105,363	4,4959	31	81	0,597439	1,0034	0,9538	1,9572	81,591	1579,777	1661,368	49,3643	81
32	0,021072	0,8643	0,0426	0,9069	32,198	78,777	110,976	4,7585	32	82	0,647188	1,0062	1,0359	2,0421	82,601	1712,413	1795,013	51,3843	82
33	0,021767	0,8671	0,0454	0,9125	33,205	83,646	116,851	5,0343	33	83	0,703060	1,0090	1,1282	2,1373	83,610	1861,423	1945,033	53,4732	83
34	0,022467	0,8700	0,0483	0,9183	34,212	88,791	123,003	5,3239	34	84	0,766202	1,0119	1,2327	2,2446	84,620	2029,877	2114,497	55,6326	84
35	0,023174	0,8728	0,0514	0,9242	35,219	94,230	129,448	5,6278	35	85	0,838069	1,0147	1,3518	2,3665	85,630	2221,670	2307,300	57,8644	85
36	0,023889	0,8756	0,0546	0,9303	36,225	99,977	136,203	5,9466	36	86	0,920255	1,0175	1,4886	2,5061	86,640	2441,836	2528,476	60,1709	86
37	0,024607	0,8785	0,0581	0,9366	37,232	106,051	143,283	6,2899	37	87	1,010665	1,0204	1,6472	2,6676	87,650	2696,897	2784,548	62,5536	87
38	0,025329	0,8813	0,0618	0,9431	38,239	112,470	150,709	6,6511	38	88	1,127902	1,0232	1,8331	2,8563	88,660	2995,609	3084,270	65,0146	88
39	0,026054	0,8842	0,0657	0,9498	39,246	119,252	158,499	6,9987	39	89	1,260528	1,0261	2,0538	3,0799	89,671	3349,933	3439,604	67,5561	89
40	0,026784	0,8871	0,0697	0,9569	40,253	126,420	166,673	7,3834	40	90	1,420198	1,0289	2,3197	3,3486	90,681	3776,603	3867,284	70,1801	90

Umidade Absoluta (humidity ratio), w

Para uma dada amostra de ar úmido, define a razão entre a massa de vapor d'água (M_w) e a massa de ar seco (M_a), i.e.,

$$w = \frac{m_w}{m_a} = \frac{\text{kg de vapor d'água}}{\text{kg de ar seco}}$$

Uma importante simplificação pode ser feita assumindo a mistura de 2 gases perfeitos. Da equação de estado par o gás perfeito e considerando a Lei de Mistura de Dalton, temos...

$$m_a = \frac{P_a V}{R_a T}$$

$$m_w = \frac{P_w V}{R_w T}$$

Substituindo em w , vem ...

$$w = \frac{R_a}{R_w} \frac{P_w}{P_a}$$

Umidade Absoluta (humidity ratio), w

$$w = \frac{R_a}{R_w} \frac{P_w}{P_a}$$

Porém, da Equação Temos que,

$$\frac{R_a}{R_w} = \frac{M_w}{M_a} = \frac{18,01534}{28,9645} = 0,62198$$

Assim vem ...

$$w = 0,62198 \frac{P_w}{P_a}$$

Além disso, como a pressão total da mistura (P) é dada pela soma das pressões parciais dos constituintes da mesma (P_a e P_w), temos que ...

Umidade Absoluta (humidity ratio), w

$$w = 0,62198 \frac{P_w}{P_a} = 0,62198 \frac{P_w}{P - P_w}$$

$$w = 0,62198 \frac{P_w}{P - P_w}$$

Que é a forma mais conhecida e muitas vezes apresentada como a definição da umidade absoluta.

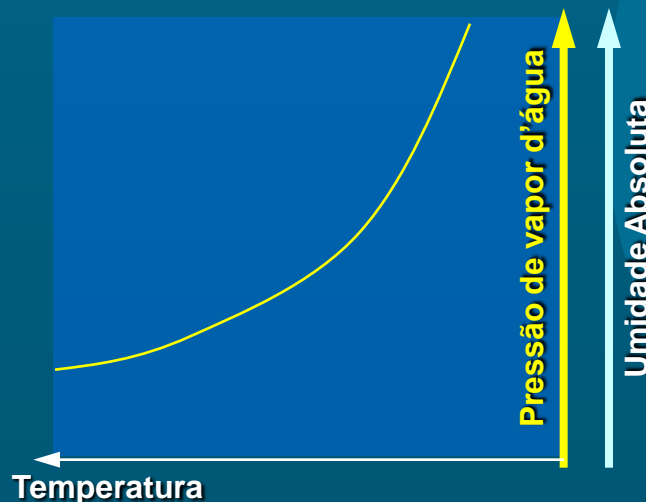
Nota: a expressão decorre da hipótese de comportamento ideal que fica comprometida quando a pressão parcial do vapor se aproxima da pressão total da mistura.

Umidade Absoluta (humidity ratio), w

$$w = 0,62198 \frac{P_w}{P - P_w}$$

A equação precedente mostra existir uma relação direta entre a umidade absoluta e a pressão parcial do vapor d'água

→ Com isso, podemos usar indistintamente p_w ou w no gráfico da linha de saturação antes apresentado



Nota:

A relação entre as escalas não é linear.

Umidade Específica (specific humidity), q

Razão entre a massa de vapor d'água (m_w) e a massa total da amostra de ar úmido, i.e.,

$$q = \frac{m_w}{m_w + m_a} = \frac{w}{(1 + w)} = \frac{\text{kg de vapor d'água}}{\text{kg de ar úmido}}$$

Umidade Relativa (relative humidity), ϕ

Razão entre a fração molar do vapor d'água presente na mistura (x_w) e a fração molar que o vapor d'água teria se a mistura estivesse saturada na mesma temperatura e pressão (x_{ws}).

$$\phi = \frac{x_w}{x_{w,s}} \bigg|_{t,p}$$

Umidade Relativa (relative humidity), ϕ

Considerando a equação dos gases perfeitos e a definição das frações molares do vapor d'água,

$$x_w = \frac{n_w}{n} \quad x_{ws} = \frac{n_{ws}}{n} \quad n \rightarrow \text{número total de moles}$$

temos,

$$\phi = \frac{x_w}{x_{w,s}} \Big|_{t,p} = \frac{P_w}{P_{w,s}}$$

Razão entre a pressão parcial do vapor d'água na mistura (P_w) e a pressão parcial que o vapor d'água teria (P_{ws}) se a mistura estivesse saturada na mesma temperatura e pressão total da mistura.

A umidade relativa varia entre 0 e 1 (0 a 100%).

$\phi = 0 \rightarrow$ ar seco

$\phi = 1 \rightarrow$ ar úmido saturado

Grau de Saturação, μ

Razão entre umidade absoluta do ar e a umidade absoluta do ar saturado, mantidas temperatura e pressão de mistura constantes.

$$\mu = \frac{w}{w_s}$$

Substituindo as expressões simplificadas da umidade absoluta e da umidade relativa temos,

$$\mu = \phi \frac{P - P_{ws}}{P - P_w} \quad \text{ou} \rightarrow \quad \mu = \phi \frac{P - P_{ws}}{P - \phi P_{ws}}$$

Nota: se a umidade relativa for alta ou a pressão parcial do vapor for baixa face a pressão da mistura, o grau de saturação será aproximadamente o mesmo que o da umidade relativa.

Propriedades Específicas

Propriedades específicas são dadas por unidade de massa da substância de interesse.

No psicrometria convencionam-se referenciar tais propriedades a massa de ar seco (e não a massa da mistura).

A razão dessa convenção deve-se ao fato de que nos processos com o ar úmido o fluxo de ar seco permanece constante enquanto que vapor d'água pode ser retirado ou adicionado ao ar úmido. Ou seja, o fluxo mássico de ar seco se conserva no processo.

Assim, o volume específico, a entalpia específica e o calor específico são referenciados a base de ar seco.

Volume Específico, v

Razão entre o volume ocupado pela mistura e a massa de ar seco presente na mesma.

$$v = \frac{V}{m_a}$$

Com a simplificação de gases perfeitos $m_a = \frac{P_a V}{R_a T}$ e lembrando que $R_a = \mathcal{R}/m_a$ temos,

$$v = 0,2870 \frac{T}{P - P_v} \left[\frac{m^3}{\text{kg ar seco}} \right]$$

que pode ser modificada usando a expressão de definição da umidade absoluta, resultando em,

$$v = 0,2870 \frac{T}{P} (1 + 1,6078 w) \left[\frac{m^3}{\text{kg ar seco}} \right]$$

com T em Kelvin e P em kPa.

Volume Específico, v

Nota: Se o volume específico da mistura fosse referido a massa de ar úmido (v_m), este seria ligeiramente menor que o volume específico referido a massa de ar seco. Com efeito, temos,

$$v_m = \frac{v}{1 + w} \left[\frac{m^3}{\text{kg ar úmido}} \right]$$

Portanto, os dois volumes específicos diferem pelo fator $(1 + w)$

É interessante notar que quanto maior a umidade absoluta maior será o volume específico do ar úmido → ou seja, menor sua densidade. Assim, o ar úmido é mais “leve” que o ar seco o que implica na facilidade com que o ar úmido se dispersa na atmosfera.

Entalpia (H) e Entalpia Específica (h)

A entalpia total da mistura é dada pela contribuição isolada da entalpia do ar seco e do vapor d'água, dada a hipótese do gás perfeito. Assim,

$$H = H_a + H_w$$

A entalpia específica da mistura (h) é obtida dividindo-se a expressão acima pela massa de ar seco, como,

$$h = \frac{H}{m_a} = \frac{m_a h_a}{m_a} + \frac{m_w h_w}{m_a}$$

e, com a definição de umidade absoluta, temos a seguinte expressão final,

$$h = h_a + w h_w \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg ar seco}} \right]$$

Calor Específico a pressão constante (C_p)

Referido a massa de ar seco é dado pela combinação dos calores específicos do ar seco C_{p_a} e do vapor d'água C_{p_w} , como,

$$C_p = C_{p_a} + w C_{p_w} \left[\frac{kJ}{kg \text{ de ar seco } ^\circ C} \right]$$

De forma simplificada,

$$C_{p_a} = 1,006 \text{ kJ/kg}^\circ C$$

$$C_{p_w} = 1,805 \text{ kJ/kg}^\circ C$$

Com tais valores e com a definição $C_p = dh/dT$, obtemos uma expressão simplificada para a entalpia específica do ar úmido,

$$h_a = 1,006.T$$

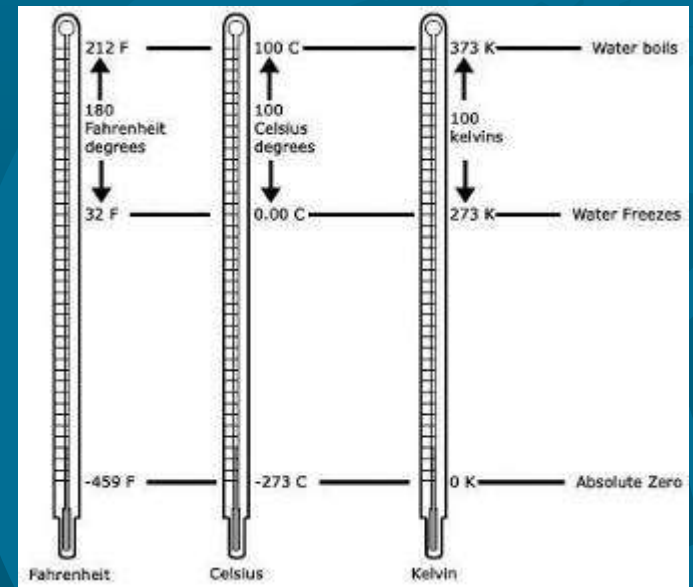
$$h_w = \underbrace{2501,3}_{\text{Entalpia de vaporização da água}} + 1,805.T$$

Entalpia de vaporização da água

$$h = 1,006.T + w(2501,3 + 1,805T)$$

Temperatura de Bulbo Seco (T_{BS})

Trata-se da temperatura do ar úmido indicada por um termômetro de coluna de líquido cujo bulbo encontra-se seco.



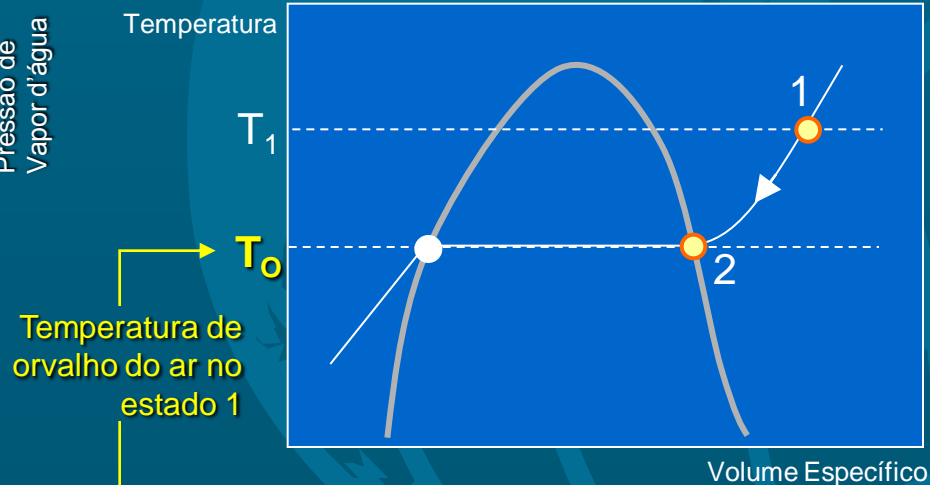
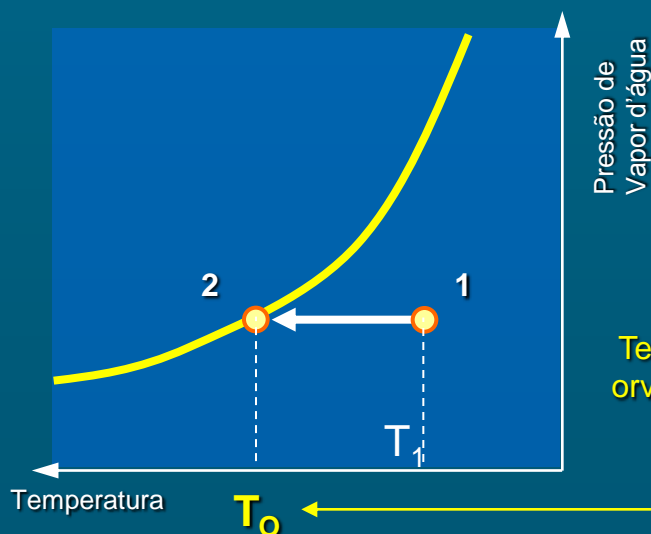
myasadata.larc.nasa.gov/glossary.php?&word=ALL

2. Parâmetros Psicrométricos**Temperatura de Orvalho (T_o)**

Temperatura que corresponde ao ponto de início da condensação do vapor d'água presente no ar úmido quando seu resfriamento ocorre a pressão constante.



<http://weather.stives-town.info/images/dew.jpg>



O higrômetro de espelho gelado (*chilled mirror hygrometer*)

The Chilled Mirror hygrometer: How It Works, Where It Works—and Where It Doesn't

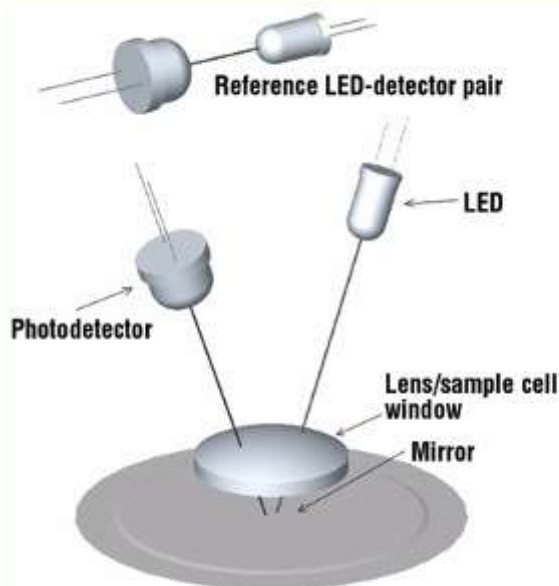


Figure 1: Chilled mirror hygrometers (CMHs) detect dew point by cooling a reflective condensation surface until water begins to condense. The condensed fine water droplets are detected optically by components such as shown here.

The Chilled Mirror hygrometer: How It Works, Where It Works—and Where It Doesn't

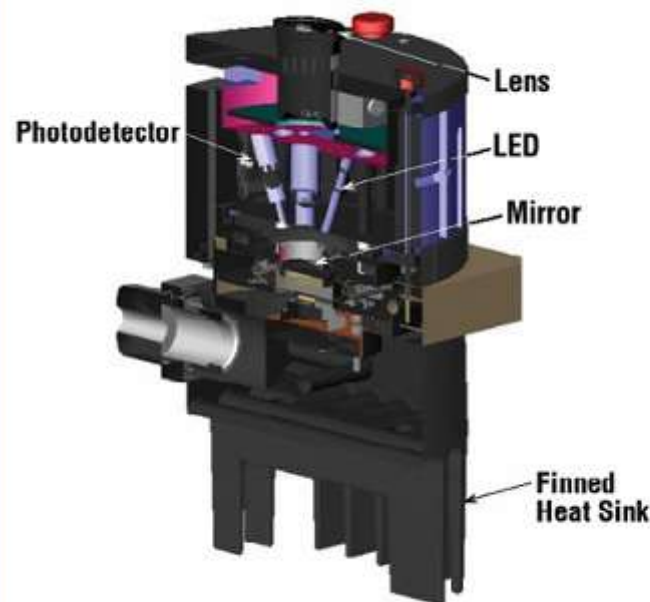


Figure 2: In a typical CMH, the gas of interest contacts only inert materials: a glass or quartz lens, a Teflon O-ring, and a stainless steel housing and metallic condensation surface.

The Chilled Mirror hygrometer: How It Works, Where It Works—and Where It Doesn't

May 1, 2005 - [David J. Beaubien](http://www.sensormag.com/sensors/Assoc+Misc/The-Chilled-Mirror-hygrometer-How-It-Works-Where-I/ArticleStandard/Article/detail/184888)

<http://www.sensormag.com/sensors/Assoc+Misc/The-Chilled-Mirror-hygrometer-How-It-Works-Where-I/ArticleStandard/Article/detail/184888>

3

A Carta Psicrométrica

Uma carta psicrométrica reúne graficamente as propriedades termodinâmicas até aqui apresentadas.

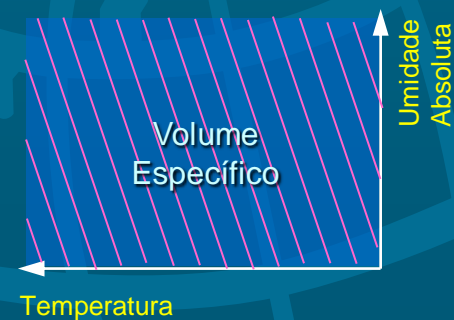
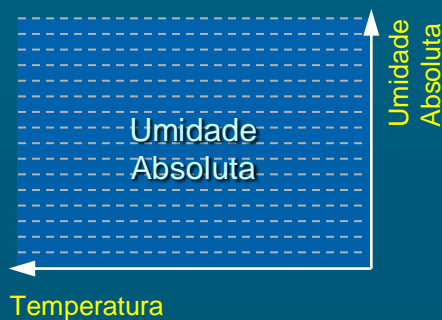
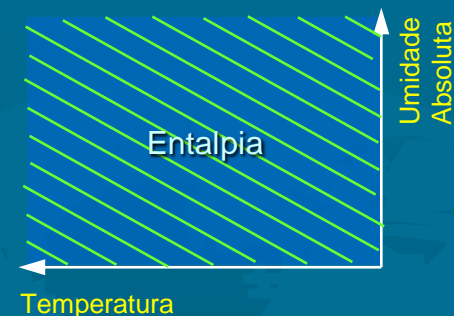
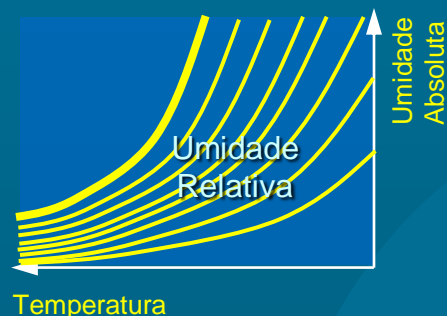
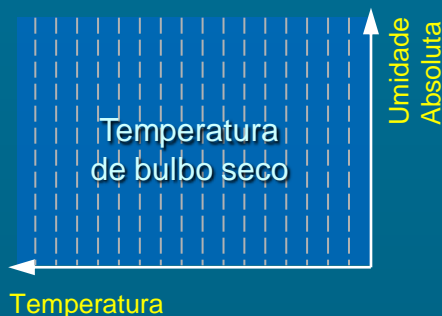
Basicamente, a carta psicrométrica é útil em duas circunstâncias:

- 1) Obtenção de propriedades do ar úmido, e;
- 2) Análise de processos.

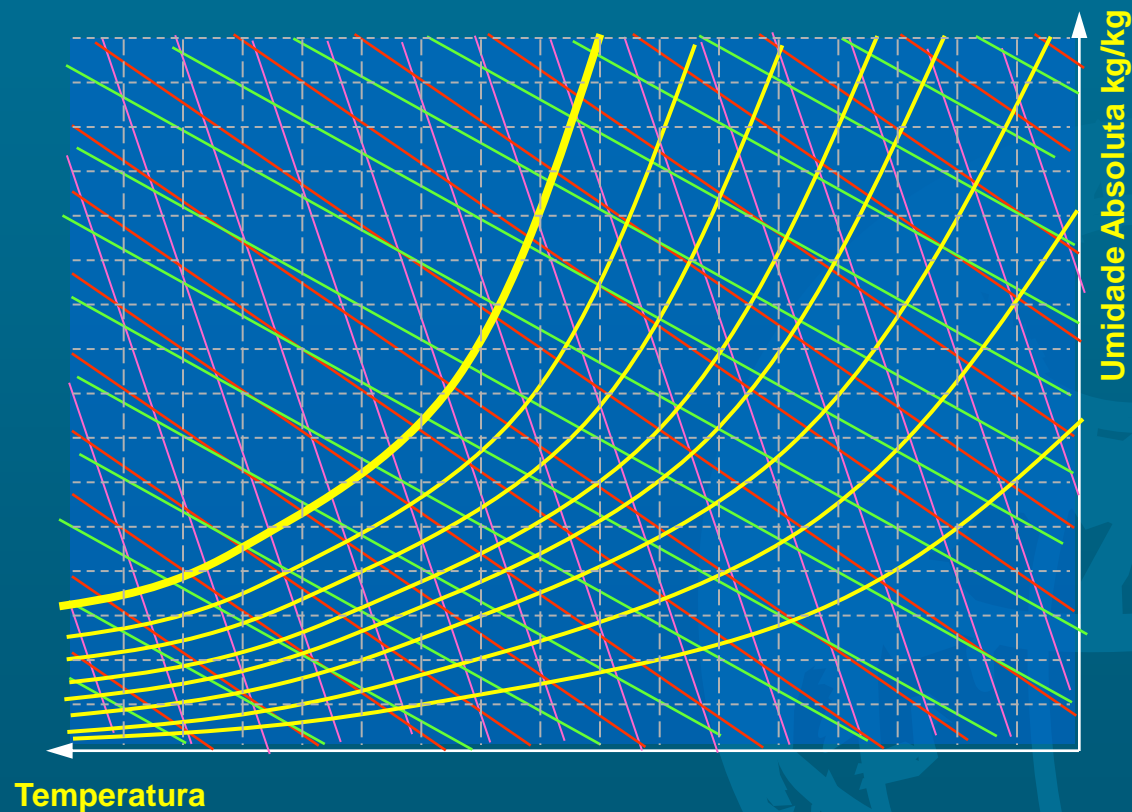
Na carta psicrométrica temos representadas uma série de linhas, representando valores constantes para:

- Umidade Absoluta
- Umidade Relativa
- Volume Específico
- Entalpia Específica
- Temperatura de Bulbo Seco
- Temperatura de Bulbo Úmido

3. A Carta Psicrométrica



3. A Carta Psicrométrica



ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 1

NORMAL TEMPERATURE SEA LEVEL

BAROMETRIC PRESSURE 101.325 kPa.



COPYRIGHT 1992

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.

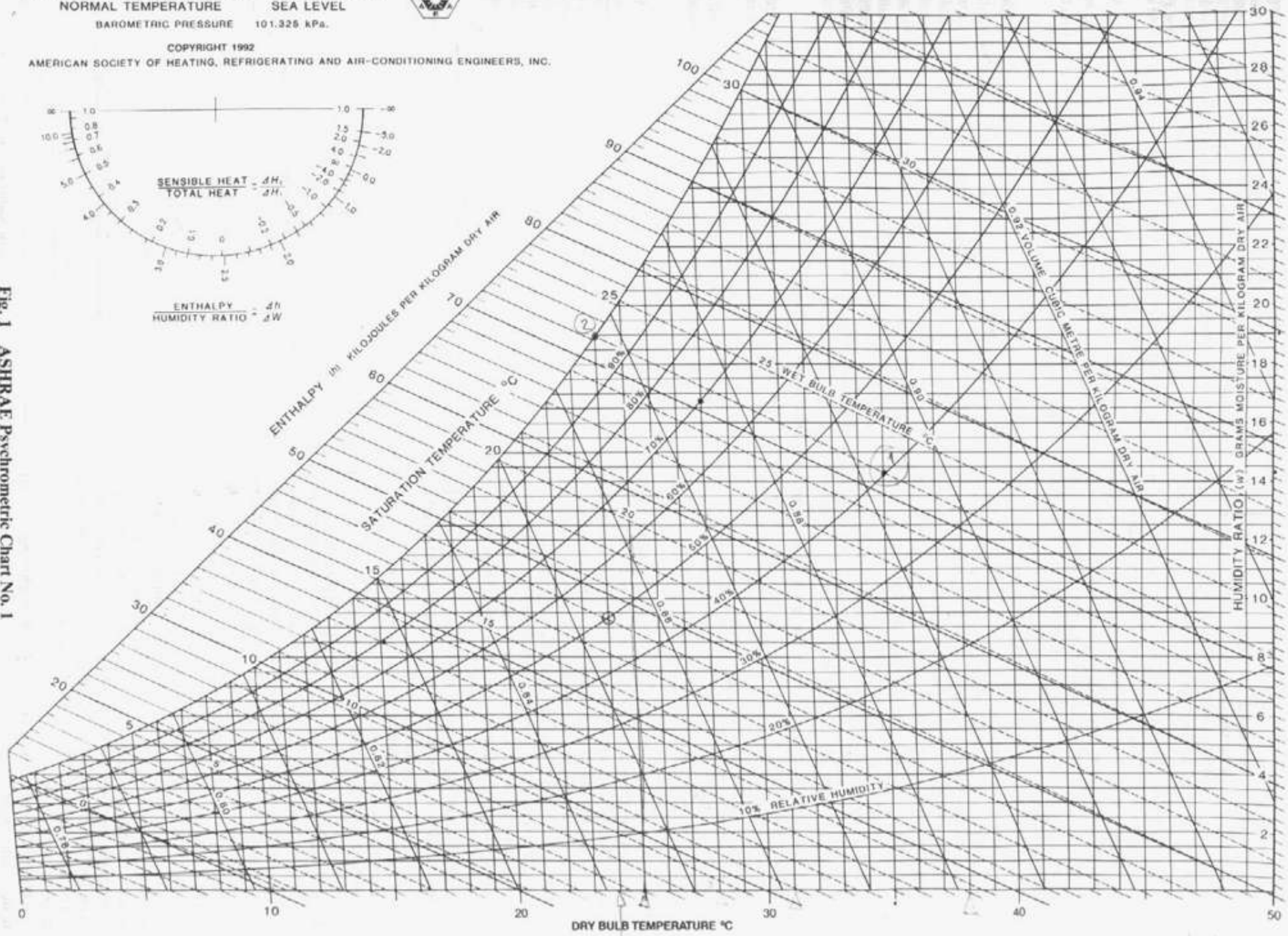
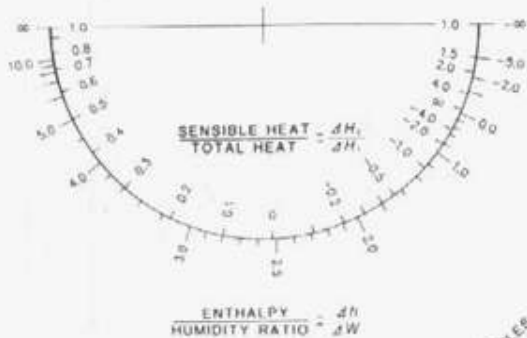
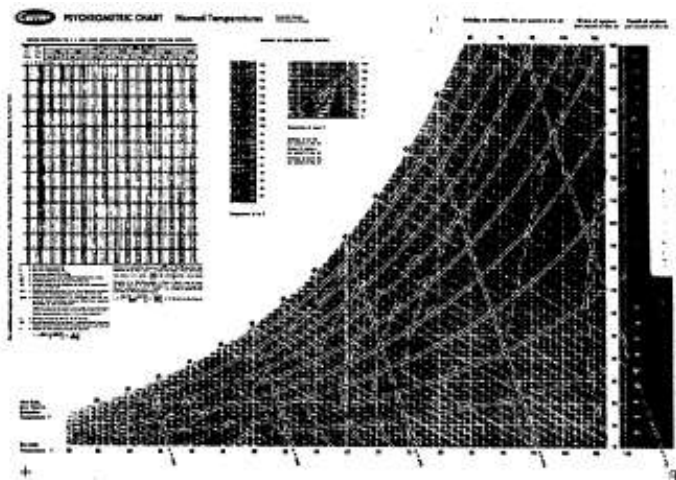


Fig. 1 ASHRAE Psychrometric Chart No. 1



'Magna Carta of Psychrometrics' Turns 100

Dec. 8, 2011, marked the 100-year anniversary of the rational psychrometric formulae, the cornerstone of all fundamental calculations in the air-conditioning industry, developed by Willis Carrier, founder of Carrier Corp., the Farmington, Conn.-based provider of air-conditioning, heating, and refrigeration systems.



Carrier

According to the company, Carrier presented the formulae, which help determine the precise correlation between temperature and humidity, on Dec. 8, 1911, at the annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers.

"His invitation to the meeting recognized air conditioning as a formal branch of engineering and turned 35-year-old Carrier into an internationally recognized leader in the field," the company said.

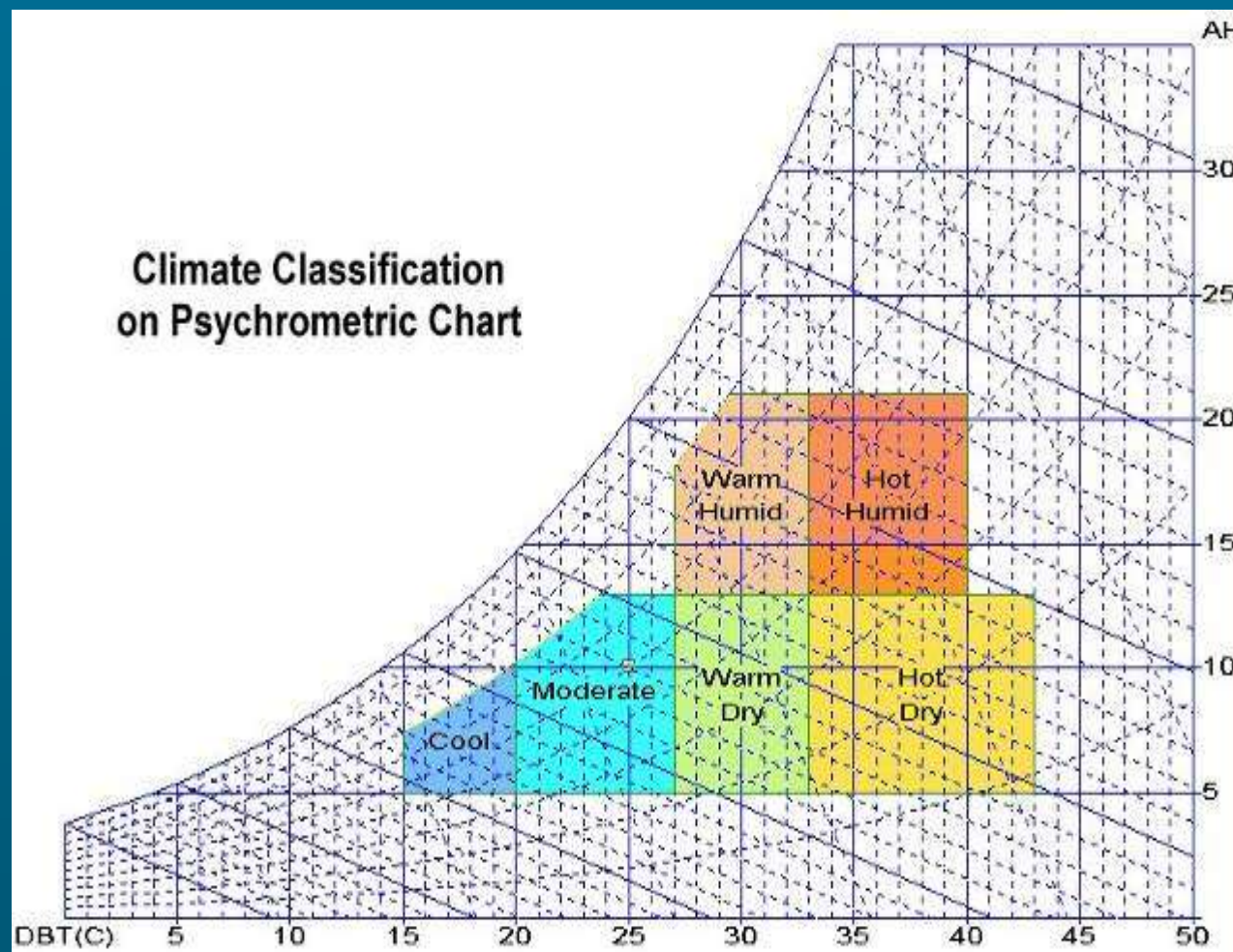
John Mandyck, chief sustainability officer for UTC Climate, Controls & Security Systems, said: "Dr. Carrier's development of the psychrometric formulae unlocked the potential of air conditioning for the world. From

his first installation that marked the birth of modern air conditioning, the psychrometric formulae enabled an entire global industry to flourish by meeting the comfort, productivity, and health needs of people."

Even today, engineering students learn the formulae as part of their coursework.

"Students of engineering today appreciate the tremendous work done by Willis Carrier," Charles Williamson, the Willis H. Carrier professor at Carrier's alma mater, Cornell University, said. "Without these early researchers and the work they did with little or no equipment, we would not have the basis for the sophisticated systems for air conditioning we have today."

For more information on Carrier and his work, visit http://bit.ly/Carrier_history.



<http://www.arch.hku.hk/~cntrui/teach/65156-7e.htm>

Exemplos

Obtenção de propriedades psicrométricas do ar úmido.

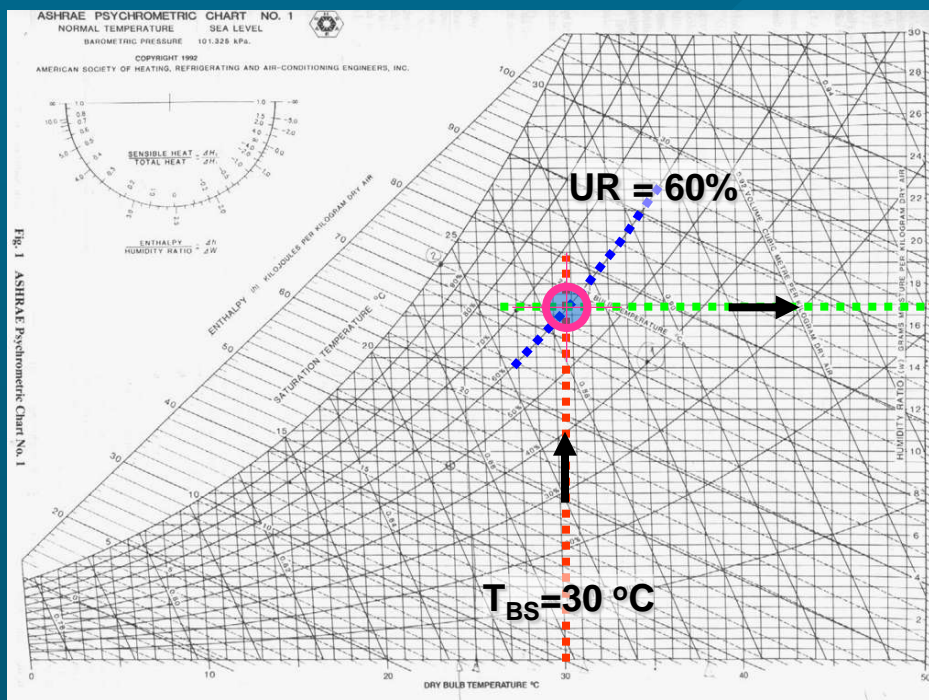
- Da carta psicrométrica;
- Pela aproximação da mistura de gases perfeitos.

Exemplo 1

Determinar a umidade absoluta do ar quando sua umidade relativa é de 60 % e sua temperatura é de 30 °C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução A)

Na carta psicrométrica, com $UR = 60\%$ e $T_{BS} = 30\text{ °C}$...



Exemplo 1

Determinar a umidade absoluta do ar com umidade relativa de 60 % e temperatura de 30 °C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução B)

Usando a Equação,

$$w = 0,62198 \frac{P_w}{P - P_w}$$

e com a definição de umidade relativa

$$\phi = \frac{x_w}{x_{w,s}} \bigg|_{t,p} = \frac{P_w}{P_{w,s}} \rightarrow P_w = \phi \cdot P_{w,s}$$

Da tabela de vapor d'água, $P_{w,s} = P_{sat} (30 \text{ °C}) = 4,246 \text{ kPa}$, logo,

$$P_w = \phi \cdot P_{w,s} = 0,6 \cdot 4,246 = 2,548 \text{ kPa}$$

Assim,

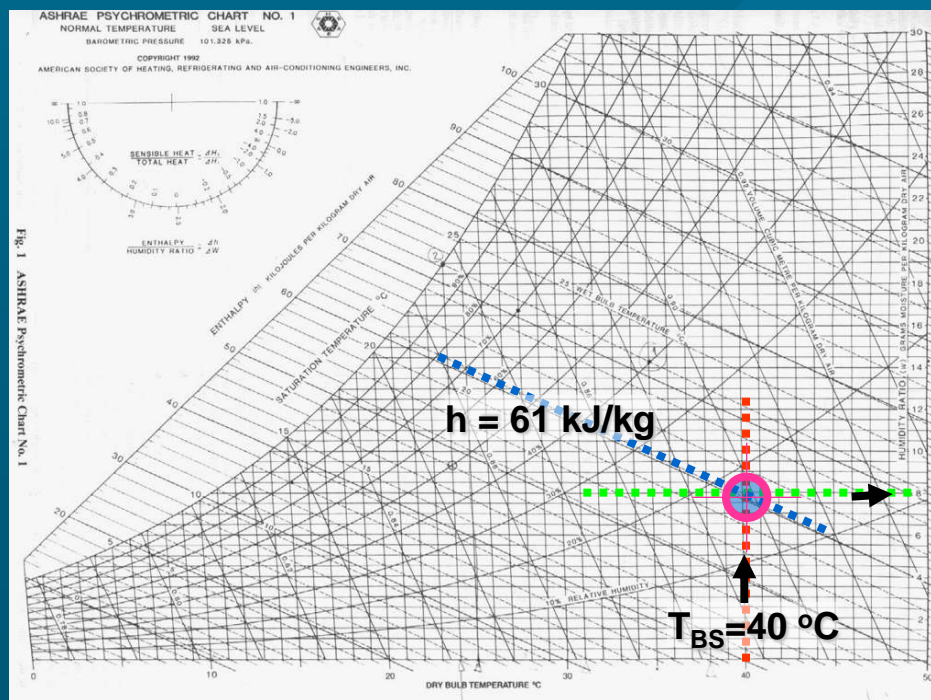
$$w = 0,62198 \frac{2,548}{101,325 - 2,548} = 0,0160 \text{ kg/kg}$$

Exemplo 2

Determinar a umidade absoluta do ar com entalpia de 61 kJ/kg e temperatura de 40 °C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução A)

Na carta psicrométrica, com $h=61$ kJ/kg e $T_{BS}=40$ °C ...



$W = 0,008$ kg/kg

Exemplo 2

Determinar a umidade absoluta do ar com entalpia de 61 kJ/kg e temperatura de 40 °C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução B)

Com a equação,

$$h = 1,006.T + w(2501,3 + 1,805T)$$

temos,

$$w = \frac{h - 1,006.T}{(2501,3 + 1,805T)}$$

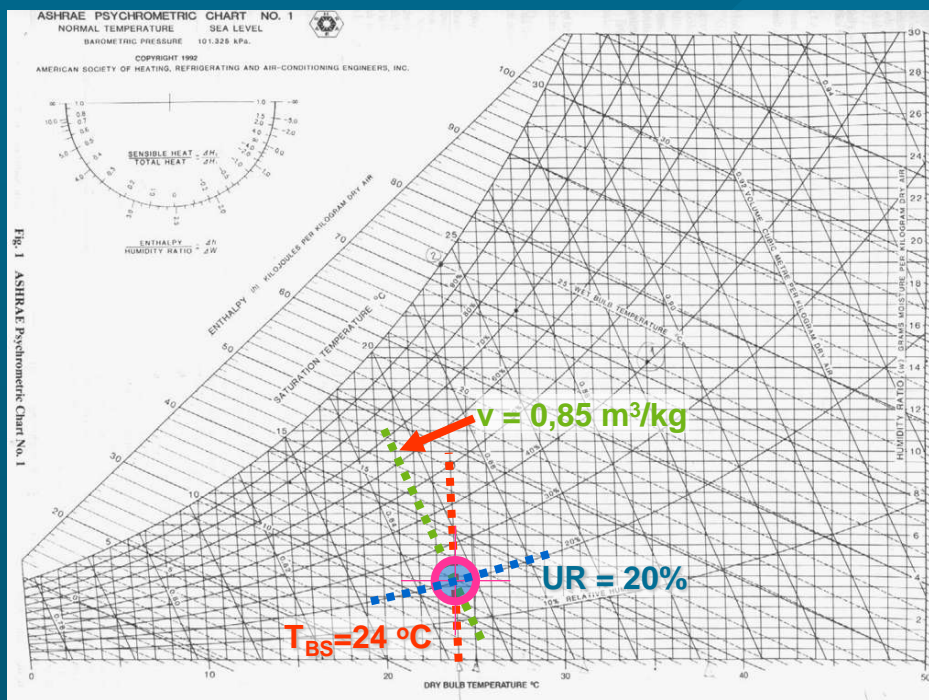
$$w = \frac{61 - 1,006.40}{(2501,3 + 1,805 \cdot 40)} = 0,008 \text{ kg/kg}$$

Exemplo 3

Qual o volume específico do ar úmido com umidade relativa de 20% e temperatura de 24 °C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução A)

Na carta psicrométrica, com $UR=20\%$ e $T_{BS}= 24\text{ °C}$...

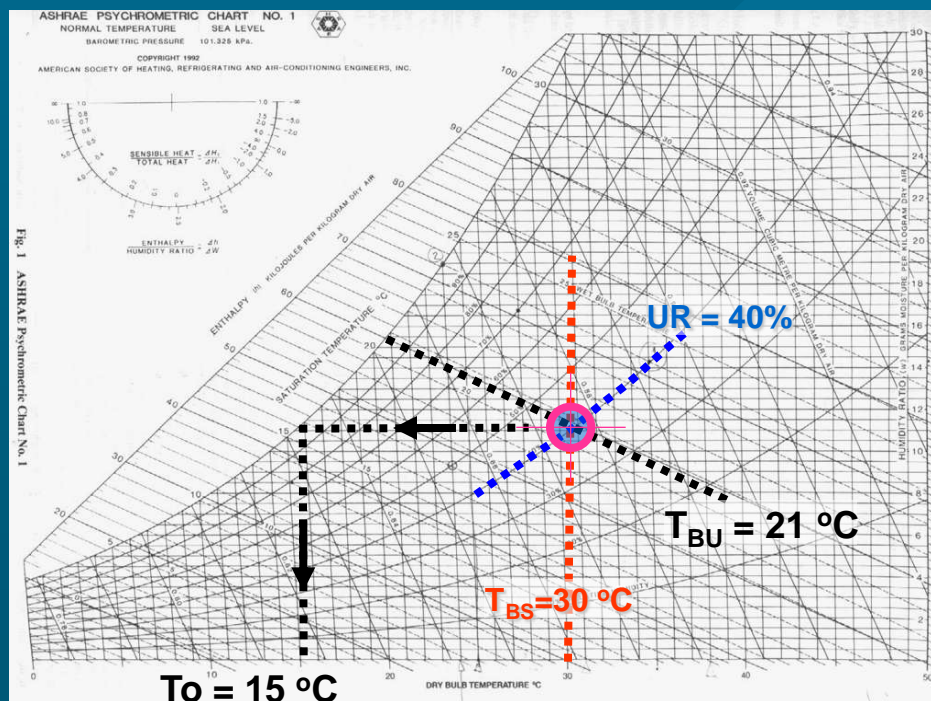


Exemplo 4

Determine as temperaturas de orvalho e bulbo úmido do ar na temperatura de 30 °C, UR de 40 % e pressão de 101,325 kPa.

Solução A)

Na carta psicrométrica, com $UR = 40\%$ e $T_{BS} = 30\text{ °C}$...



Exemplo 5

A umidade relativa e a temperatura do ar em um ambiente são de 60 % e 40 °C respect. Se a pressão é normal (101,325 kPa) calcule a umidade absoluta do ar e o grau de saturação.

A pressão parcial do vapor d'água saturado P_{ws} à temperatura de 40 °C vale 7,384 kPa (Tabela)

$$P_w = \phi \cdot P_{ws} = 0,6 \cdot 7,384 \text{ kPa} = 4,430 \text{ kPa}$$

A umidade absoluta (w) é calculada por,

$$w = 0,62198 \frac{P_w}{P - P_w} = 0,62198 \frac{4,430}{101,325 - 4,430} = 0,0284 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg ar seco}}$$

O grau de saturação é dado por,

$$\mu = \phi \frac{P - P_{ws}}{P - P_w} = 0,60 \cdot \frac{101,325 - 7,384}{101,325 - 4,430} = 0,5817 = 58,17\%$$

4

A Transferência de Calor e Massa

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

A Transferência Simultânea de Calor e Massa

O Potencial de Entalpia

Lei da Linha Reta

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

Como sabemos, a *Lei do Resfriamento de Newton* estabelece a taxa de transferência de calor entre um fluido e uma superfície como,

$$\dot{Q} = h_c A (T_{\text{sup}} - T_{\infty})$$

Como bem colocado por Simões Moreira (1999) “a aparente simplicidade desta equação esconde o problema fundamental da convecção de calor ... a determinação do coeficiente h_c que depende de diversos parâmetros”.

Uma análise dimensional das equações que regem a transferência de calor na convecção resulta na definição do número de Nusselt, como,

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{k}$$

A mesma análise indica ainda existir uma correlação do tipo,

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

De forma análoga à Lei do Resfriamento de Newton podemos definir a taxa de transferência da massa entre uma parede molhada e um fluxo de ar úmido, como,

$$\dot{m}_v = h_m A (\rho_{\text{sup}} - \rho_{\infty})$$

Como antes, o coeficiente de transferência de massa h_m a pode ser relacionado a outras grandezas adimensionais, como,

Número de Sherwood

$$Sh = \frac{h_m \cdot L}{D}$$

$$Sh = f(Re, Sc)$$

Número de Schimdt

$$Sc = \frac{\nu}{D}$$

$D \rightarrow$ coeficiente de difusão de massa [m^2/s]

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

Para escoamento externo sobre superfície plana nos regimes laminar e turbulento (com início turbulento) podemos escrever,

$$Nu = f(Re, Pr) \rightarrow \rightarrow Nu = a(Re^b - A)Pr^c$$

onde, as constantes A , a , b e c , dependem da geometria e outras condições de escoamento (ver literatura).

De forma análoga, a transferência de massa no escoamento externo sobre superfície úmida plana pode ser representada como,

$$Sh = f(Re, Sc) \rightarrow \rightarrow Sh = a(Re^b - A)Sc^c$$

Dividindo a equação para Nu pela equação para Sh , após algum rearranjo, temos,

$$\frac{h_c}{h_m C_p \rho} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{1-c} = \left(\frac{\alpha}{D} \right)^{1-c} = Le^{1-c}$$

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

$$\frac{h_c}{h_m C_p \rho} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{1-c} = \left(\frac{\alpha}{D} \right)^{1-c} = Le^{1-c}$$

Se introduz aqui um novo adimensional – o número de Lewis, Le , definido pela razão entre os números de Schmidt e Prandtl, ou, de forma mais simples, pela razão entre as difusividades térmica e de massa.

O valor do número de Lewis para o ar úmido vale aproximadamente 0,865 e aumenta ligeiramente com a temperatura, de forma que,

$$R_{Le} = \frac{h_c}{h_m C_p \rho} = (0,86)^{2/3} = 0,90 \cong 1,00$$

O valor unitário para a relação de Lewis R_{Le} implica, entre outras coisas, que o coef. de transf. de massa pode ser diretamente determinado a partir do conhecimento do coeficiente de transferência de calor.

Exemplo Numérico

Um filme de água com temperatura de 27°C sobre uma superfície plana de 0,5m x 0,5m está exposto a brisa de ar atmosférico com velocidade de 10 m/s, pressão normal, umidade relativa de 60% e temperatura também de 27°C. Calcule a taxa de evaporação da água para o ar.

Como primeira aprox. se adotam as propriedades do ar seco a 27°C,

$$\mu = 1,85 \times 10^{-5} \text{ Pa.s} ; C_p = 1,01 \text{ kJ/kg.K} ; \rho = 1,161 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$Pr = 0,707 ; k = 0,026 \text{ W/m.K}$$

Cálculo do número de Reynolds,

$$Re = \frac{VL\rho}{\mu} = \frac{10 \cdot 0,5 \cdot 1,161}{1,85 \times 10^{-5}} = 3 \times 10^5$$

Cálculo do número de Nusselt,

$$Nu = 0,644 (3 \times 10^5)^{1/2} (0,707)^{1/3} = 324,0$$

Cálculo de h_c ,

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{k} \Rightarrow h_c = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{324,0 \cdot 0,026}{0,5} = 16,85 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Usando a relação de Lewis, sendo $R_{Le} \approx 1$, temos,

$$h_m = \frac{h_c}{C_p \rho} = \frac{16,85}{1,01 \times 10^3 \cdot 1,161} = 0,014 \text{ m/s}$$

Exemplo Numérico

continuação ...

Determinação da densidade do vapor d'água no ar úmido na condição da interface com a superfície úmida “sup” e ao longe da mesma “∞”;

$$T = 27^{\circ}\text{C} \text{ e } \phi = 100\% \Rightarrow w_{\text{sup}} = 0,0227 \text{ kg}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$$

$$T = 27^{\circ}\text{C} \text{ e } \phi = 60\% \Rightarrow w_{\text{sup}} = 0,0134 \text{ kg}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$$

Então ...

$$\rho_{\text{sup}} = \rho \cdot w_{\text{sup}} = 1,161 \cdot 0,0227 = 0,0264 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$\rho_{\infty} = 0,0156 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

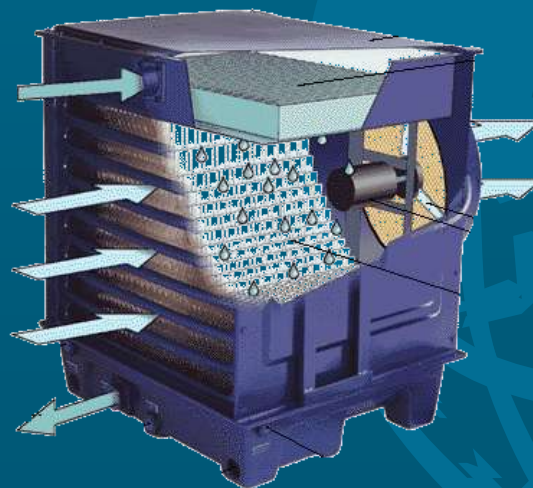
Finalmente, o fluxo evaporativo de massa será dado por,

$$\dot{m}_v = 0,014 \cdot 0,5^2 (0,0264 - 0,0156) = 0,038 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

A Transferência Simultânea de Calor e Massa

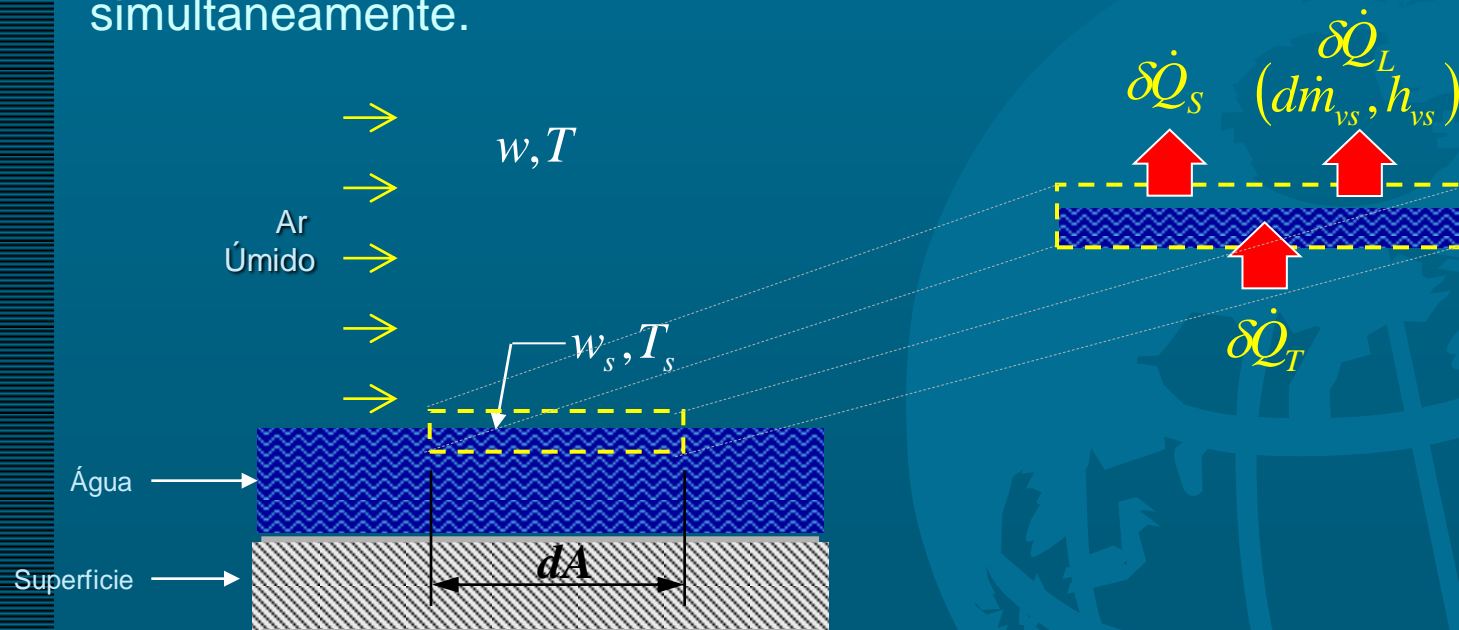
A “manipulação” do ar úmido geralmente resulta na adição ou remoção de vapor d’água. Isso é particularmente verdade para torres de resfriamento, condensadores evaporativos, serpentinas de resfriamento e desumidificação, umidificadores, etc.

Processos evaporativos e de condensação também são comuns na natureza.



A Transferência Simultânea de Calor e Massa

A mudança de fase da água requer o fornecimento ou remoção de calor correspondente à sua entalpia de vaporização. Assim, os processos de transferência de calor e massa devem ser considerados simultaneamente.



A Transferência Simultânea de Calor e Massa

Fluxo de calor sensível

$$\partial \dot{Q}_S = h_c dA (T_s - T)$$

Taxa de transferência de vapor d'água

$$\partial \dot{m}_v = h_m \rho_a dA (w_s - w)$$

Conservação da energia para o v.c.

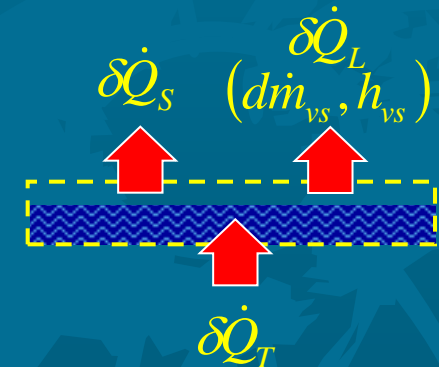
$$\delta \dot{Q}_L = \delta \dot{Q}_T - \delta \dot{Q}_S = h_{LVs} d\dot{m}_v$$

Com $\partial \dot{m}_v$ na equação acima temos

$$\delta \dot{Q}_L = \rho_a h_{LVs} h_m dA (w_s - w)$$

Finalmente, das equações acima, o fluxo de calor total será dado por,

$$\delta \dot{Q}_T = \delta \dot{Q}_S + \delta \dot{Q}_L = [h_c (T_s - T) + \rho_a h_{LVs} h_m (w_s - w)] dA$$



O Potencial de Entalpia

Primeiramente considerando que a entalpia específica de uma mistura pode ser dada pela soma das entalpias individuais; podemos escrever para o ar úmido que,

$$h_s - h = (h_{sa} - h) + (w_s h_{vs} - w h_v)$$

Somando e subtraindo o produto $w_s h_{vs}$ ao segundo membro e ainda admitindo o comportamento de gás perfeito, temos,

$$h_s - h = C p_u (T_s - T) + h_{vs} (w_s - w)$$

onde o calor específico do ar úmido é $C p_u = C p_a + w C p_v$

Isolando a diferença de temperatura da equação anterior vem,

$$T_s - T = \frac{(h_s - h) - h_{vs} (w_s - w)}{C p_u}$$

Esta última equação substituída na equação anterior para o calor total permite eliminar desta a temperatura. Temos

O Potencial de Entalpia

$$T_s - T = \frac{(h_s - h) - h_{Vs}(w_s - w)}{Cp_u}$$

$$\delta\dot{Q}_T = \delta\dot{Q}_S + \delta\dot{Q}_L = [h_c(T_s - T) + \rho_a h_{LVs} h_m(w_s - w)]dA$$

$$\delta\dot{Q}_T = \frac{h_c dA}{Cp_u} \left[(h_s - h) + \frac{(w_s - w)}{R_{Le}} (h_{LVs} - R_{Le} h_{Vs}) \right]$$

Para esta última considerando que $R_{Le} \cong 1 \Rightarrow h_{LVs} - R_{Le} h_{Vs} \approx h_{LVs}$ o termo resultante $(w - w_s)h_{Ls}$ é desprezível em relação a $h_s - h$. Assim, somente o primeiro termo entre colchetes é significativo.

Com isso o fluxo total de calor será dado por,

$$\delta\dot{Q}_T = \frac{h_c dA}{Cp_u} (h_s - h)$$

O Potencial de Entalpia - Conclusões

A equação anterior é importante pois permite determinar o fluxo de calor total em equipamentos de contato direto entre o ar e a água (torres de resfriamento, etc.).

$$\delta\dot{Q}_T = \frac{h_c dA}{Cp_u} (h_s - h) \begin{cases} \text{se } h > h_s \rightarrow \delta\dot{Q}_T \text{ se dá do ar para a água} \\ \text{se } h < h_s \rightarrow \delta\dot{Q}_T \text{ se dá da água para o ar} \end{cases}$$

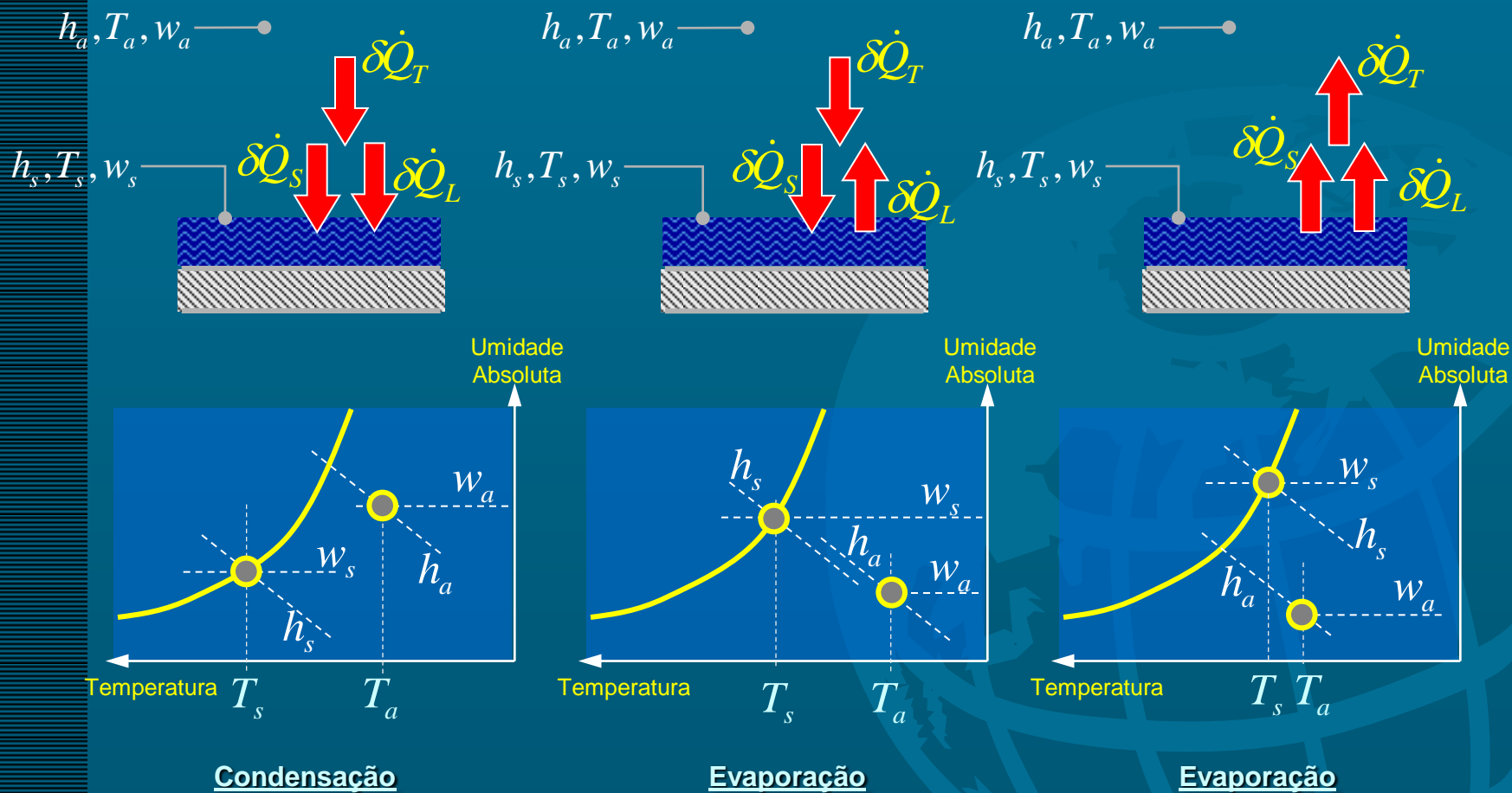
Além disso, já era óbvio que:

$$\partial\dot{Q}_s = h_c dA (T_s - T) \begin{cases} \text{se } T > T_s \rightarrow \partial\dot{Q}_s \text{ se dá do ar para a água} \\ \text{se } T < T_s \rightarrow \partial\dot{Q}_s \text{ se dá da água para o ar} \end{cases}$$

$$\delta\dot{Q}_L = \rho_a h_{LVs} h_m dA (w_s - w) \begin{cases} \text{se } w > w_s \rightarrow \delta\dot{Q}_L \text{ se dá do ar para a água} \\ \text{se } w < w_s \rightarrow \delta\dot{Q}_L \text{ se dá da água para o ar} \end{cases}$$

Vejamos esses 3 casos →

O Potencial de Entalpia - Conclusões



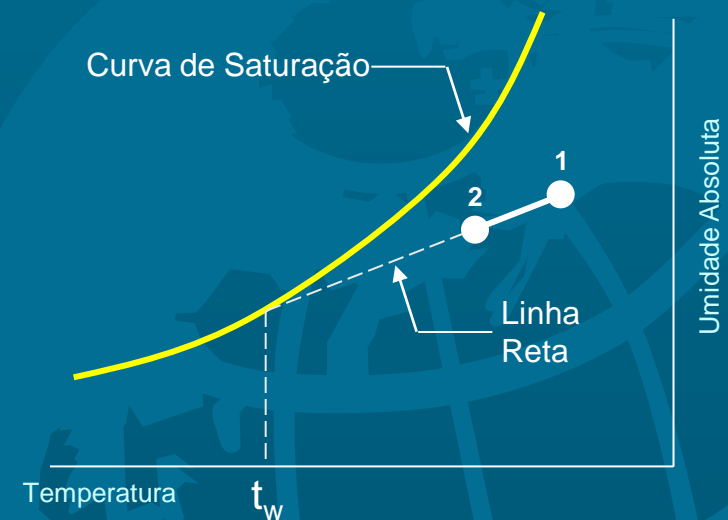
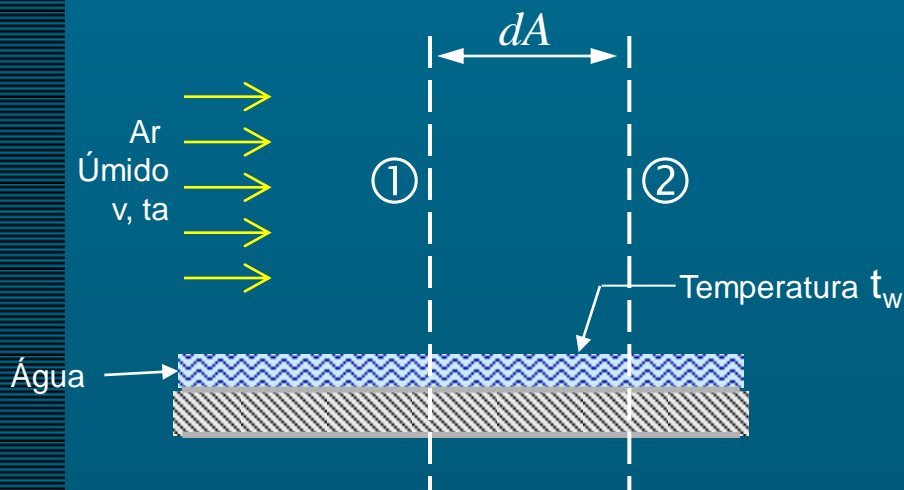
Lei da Linha Reta



Lei da Linha Reta

A lei da linha reta estabelece que:

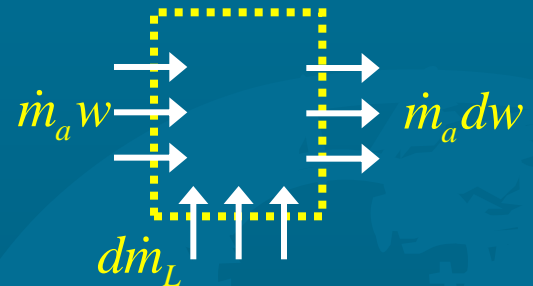
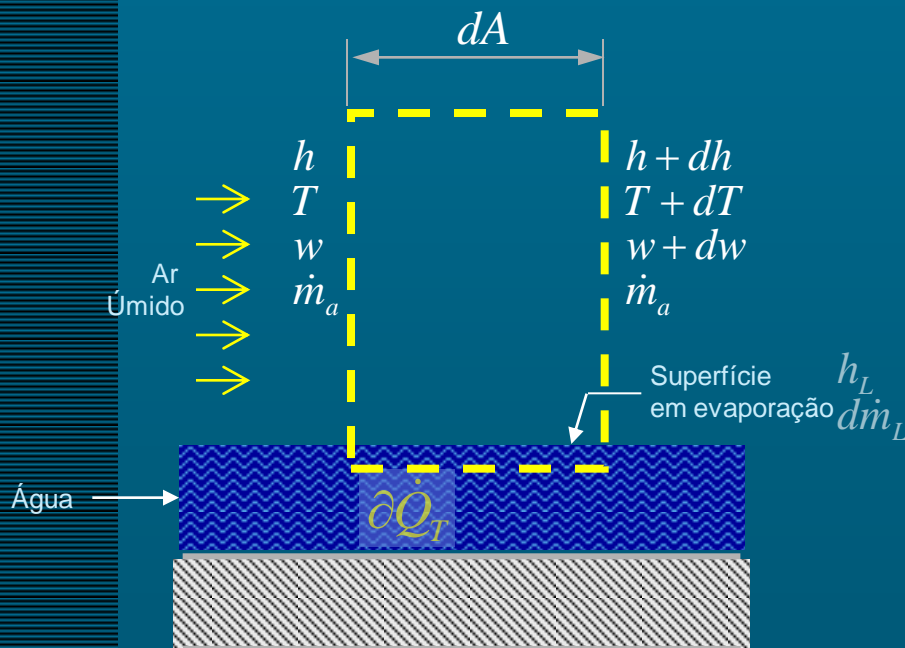
“quando o ar úmido transfere calor e massa de/para uma superfície molhada, o estado do ar tende para a temperatura da superfície úmida (t_w) sobre a linha de saturação”



As taxas de transf. de calor e massa se interrelacionam de tal modo que o processo se mostra como uma reta no plano temperatura - umidade absoluta

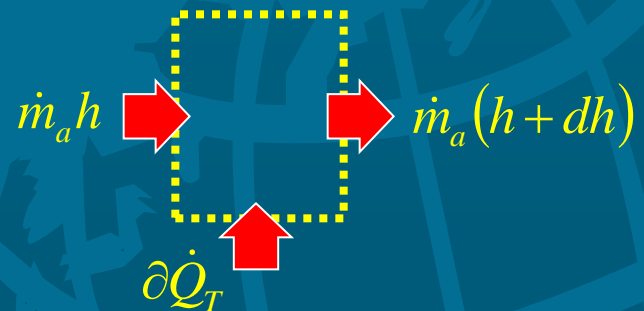
Lei da Linha Reta

A conservação da massa e energia aplicada ao volume de controle abaixo resulta em,



$$\dot{m}_a w + d\dot{m}_L = \dot{m}_a (w + dw)$$

$$d\dot{m}_L = \dot{m}_a dw$$



$$\delta \dot{Q}_T = \dot{m}_a (h - dh) - \dot{m}_a h - h_L d\dot{m}_L$$

$$\delta \dot{Q}_T = \dot{m}_a h - h_L d\dot{m}_L$$

Lei da Linha Reta

Substituindo $d\dot{m}_L$ do balanço de massa, no balanço de energia, vem,

$$\partial \dot{Q}_T = \dot{m}_a (dh - h_L dw)$$

Tínhamos também mostrado que,

$$\delta \dot{Q}_T = \frac{h_c dA}{Cp_u} (h_s - h)$$

Igualando, vem,

$$dh - h_L dw = \frac{h_c dA}{Cp_u} (h_s - h)$$

Usando a definição do coeficiente de transferência de massa,

$$\delta \dot{m}_v = h_m \rho_a dA (w_s - w)$$

e considerando que $d\dot{m}_v = d\dot{m}_L = \dot{m}_a dw$, então,

$$dA = \frac{\dot{m}_a dw}{\rho_a h_m (w_s - w)}$$

Substituindo em

re-arranjando
vem

Lei da Linha Reta

$$\frac{dh}{dw} = R_{Le} \frac{(h_s - h)}{(w_s - w)}$$

onde a relação de Lewis (R_{Le}) aparece quando a densidade do ar seco é confundida com a de mistura.

Como $R_{Le} \approx 1$, a equação acima pode se integrada pelo método de separação de variáveis resultando em,

$$\frac{(h_s - h)}{(w_s - w)} = C$$

onde C é uma constante de integração cujo valor pode ser obtido da condição inicial do ar, ou seja, $w=w_1$ para $h=h_1$, de forma que,

$$C = \frac{(h_s - h_1)}{(w_s - w_1)}$$

Igualando, temos,

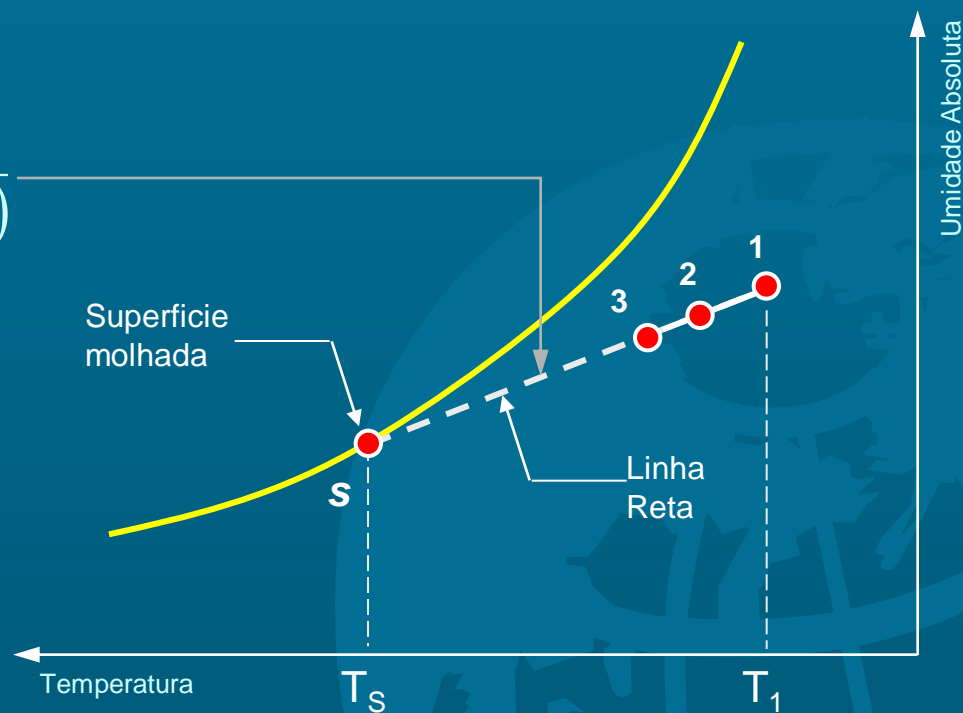
$$\frac{(h_s - h)}{(w_s - w)} = \frac{(h_s - h_1)}{(w_s - w_1)}$$

(Lei da Linha Reta)

Lei da Linha Reta

Lei da Linha Reta

$$\frac{(h_s - h)}{(w_s - w)} = \frac{(h_s - h_1)}{(w_s - w_1)}$$



Uma sucessão de estados é verificada tal que....

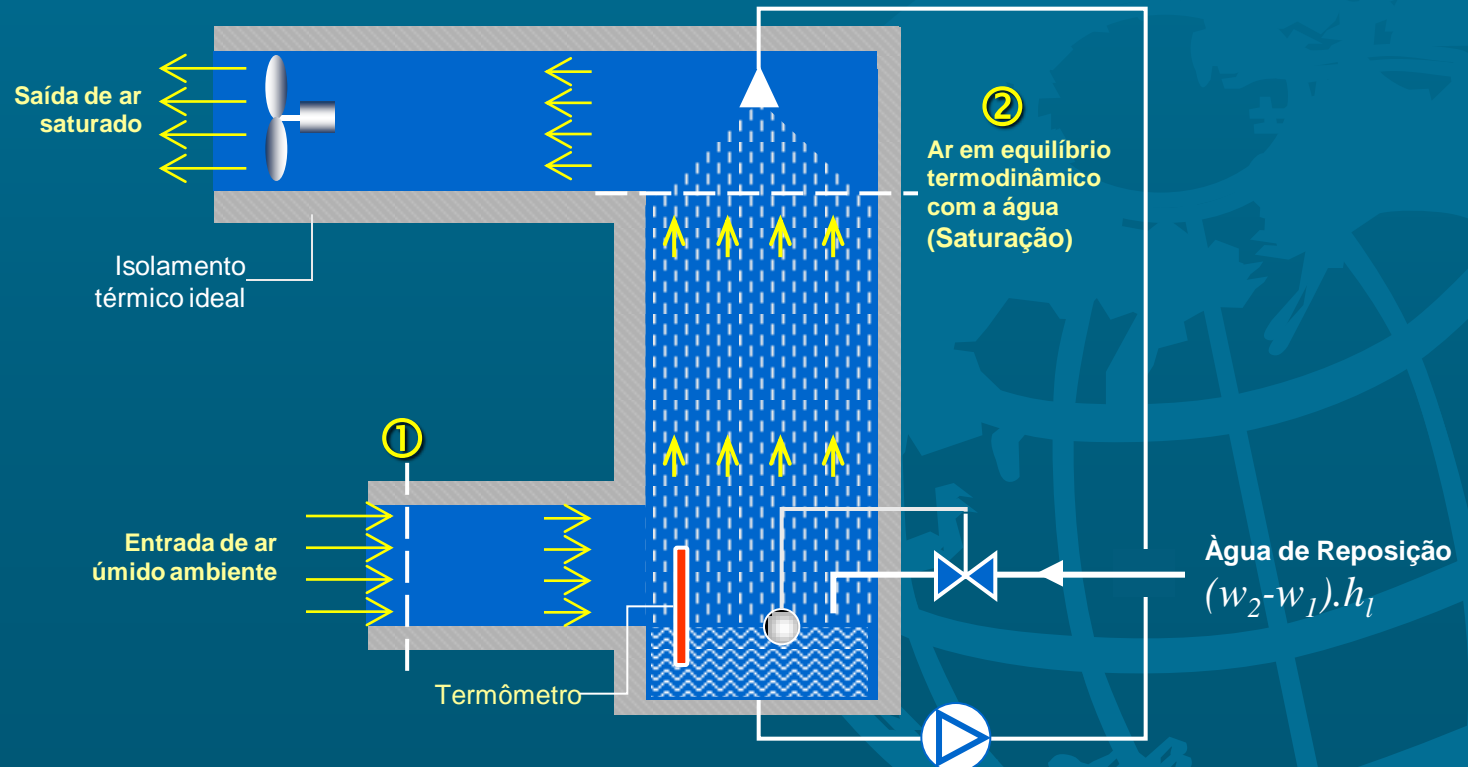
$$\frac{(h_s - h_1)}{(w_s - w_1)} = \frac{(h_s - h_2)}{(w_s - w_2)} = \frac{(h_s - h_3)}{(w_s - w_3)} = \dots = \frac{(h_s - h_n)}{(w_s - w_n)} = C$$

5

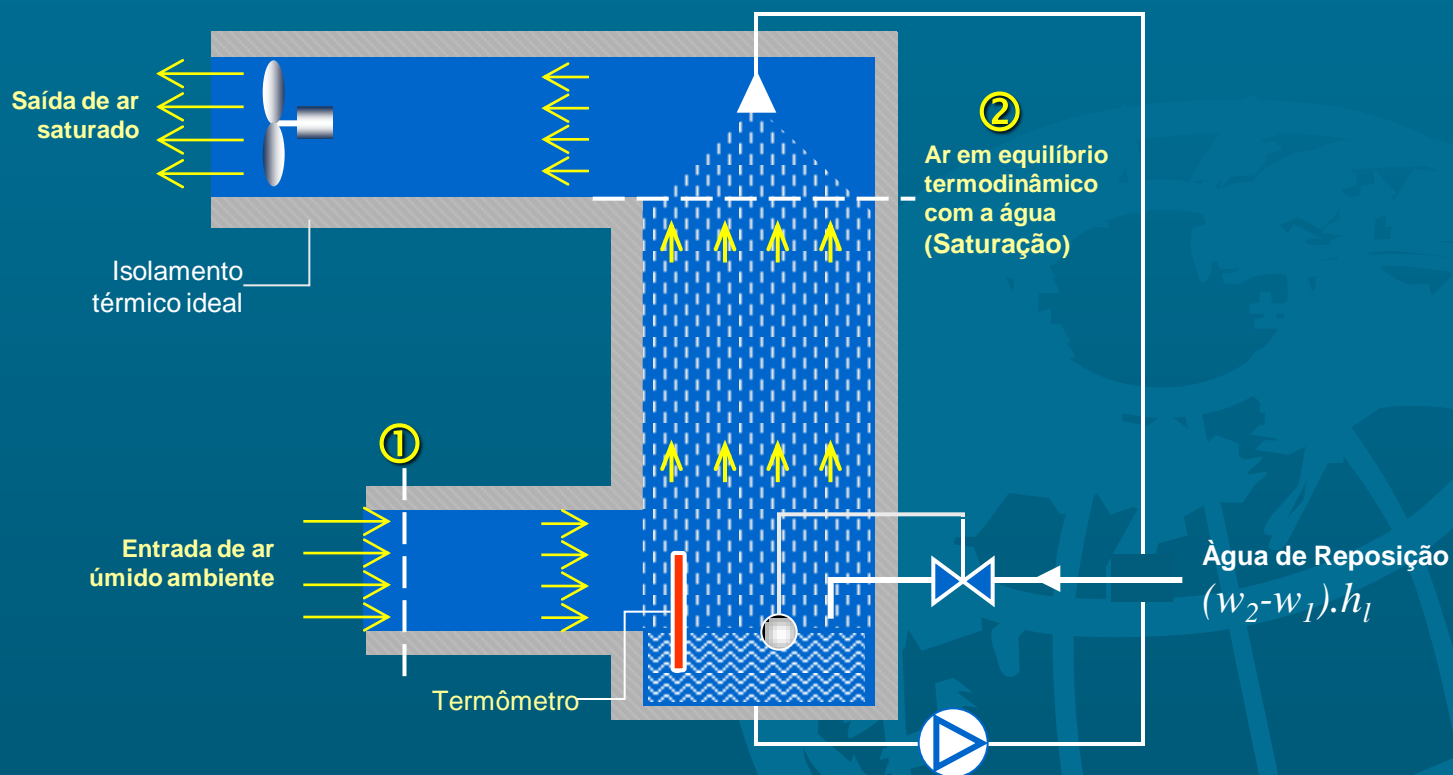
Saturação Adiabática e a Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática

O saturador adiabático é um dispositivo ideal no qual o ar úmido escoá contra uma fina névoa de água, a pressão constante.

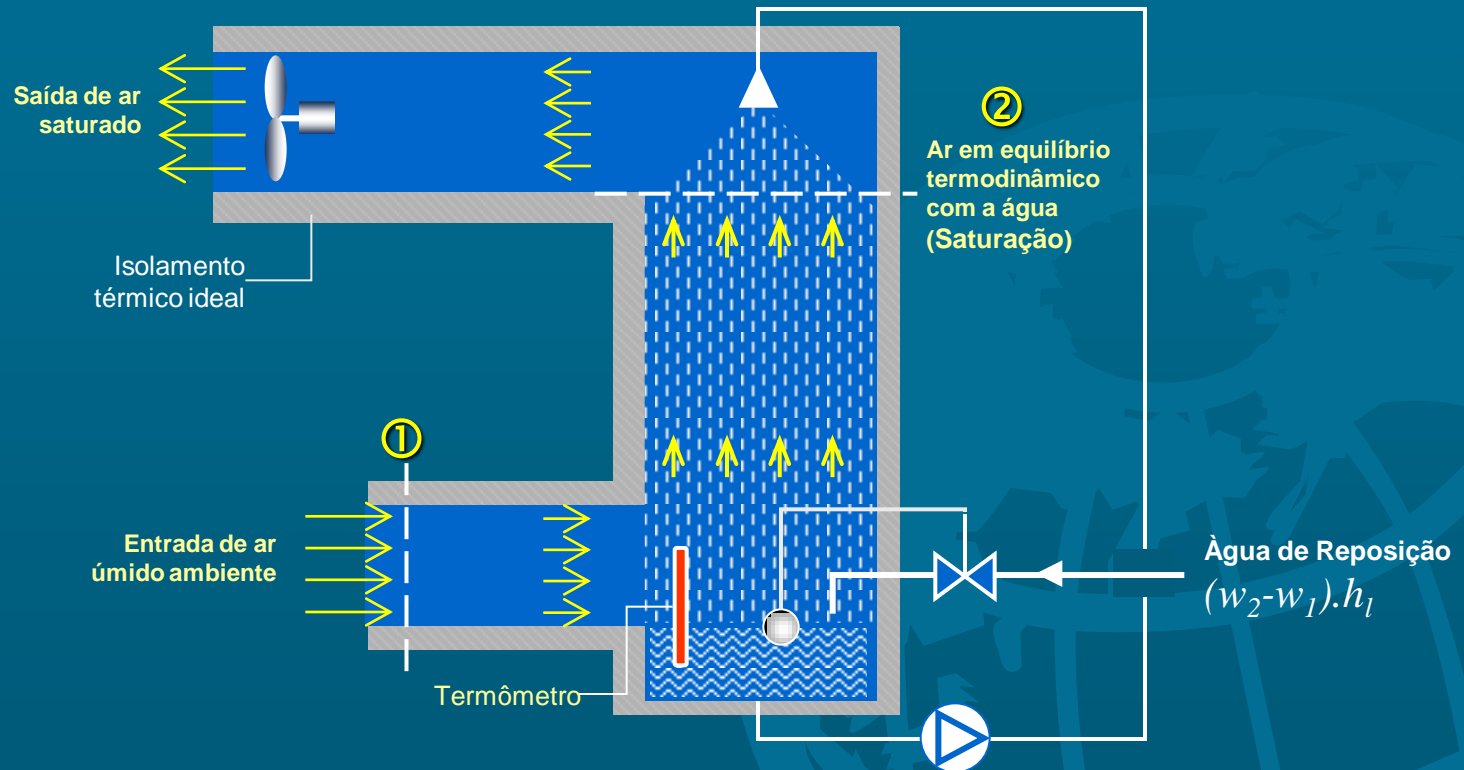


Saturação Adiabática



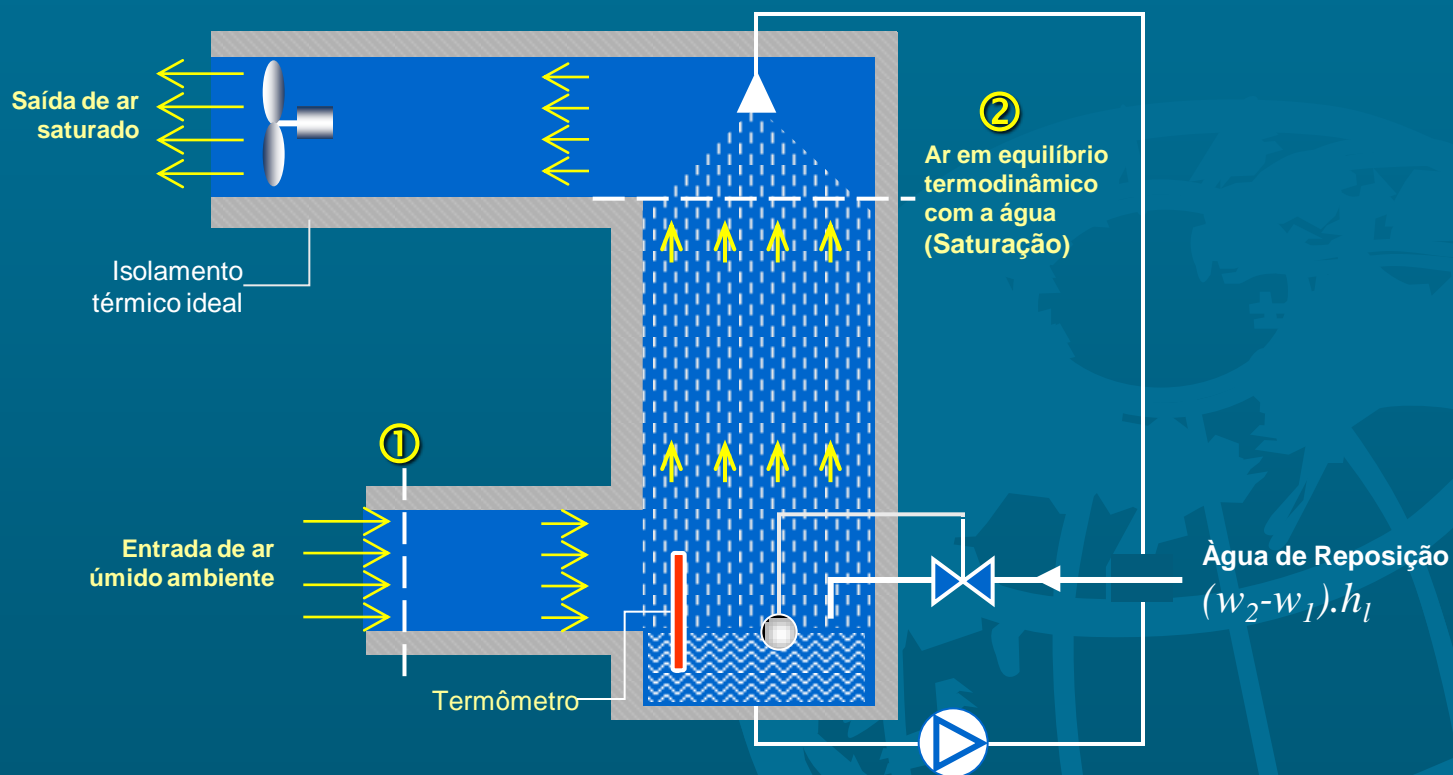
Ao longo do saturador a área de transferência de calor e massa entre o ar úmido e as gotículas de água é tal que, ao sair do saturador o ar encontra-se em equilíbrio termodinâmico com a água, isto é, saturado.

Saturação Adiabática



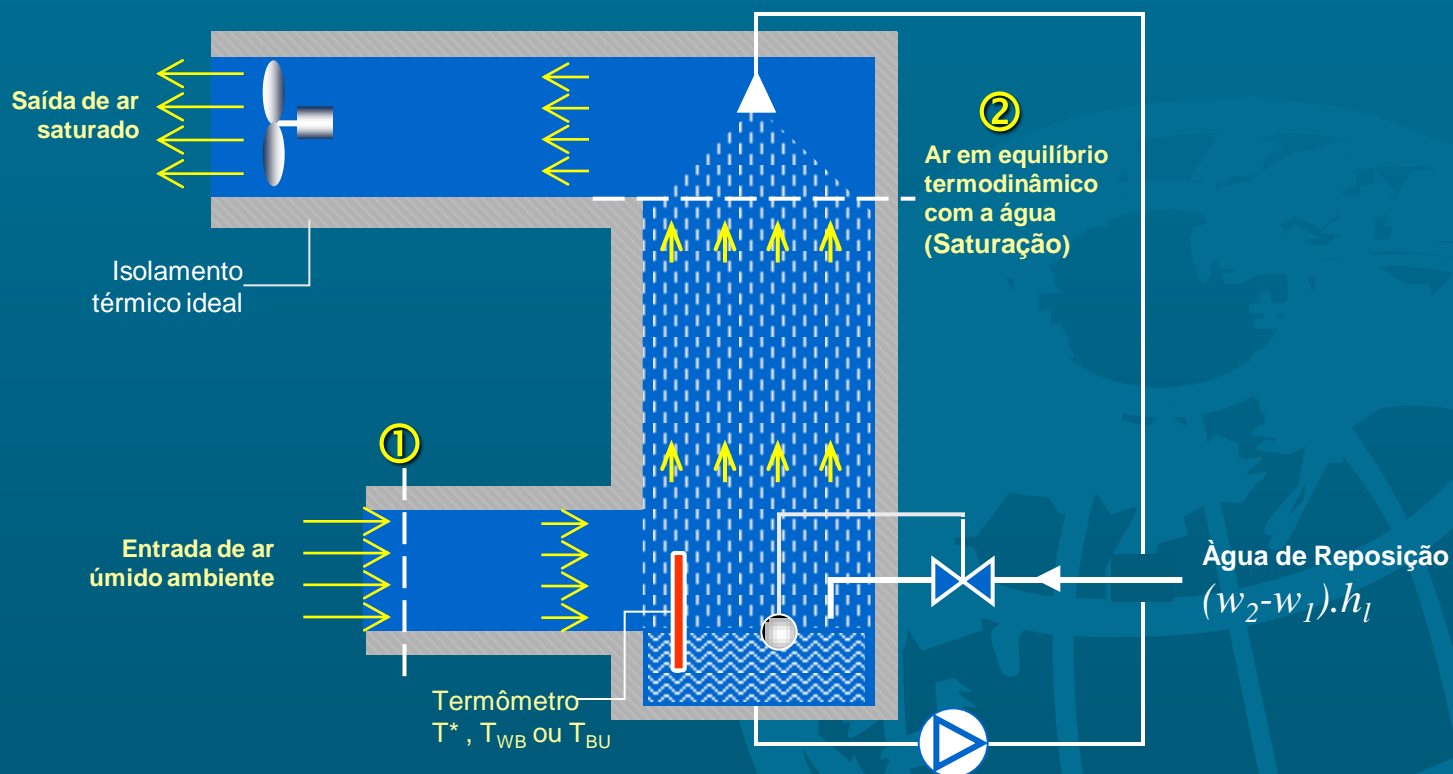
Um isolamento térmico ideal é considerado de forma que o processo é adiabático (não há troca de calor com o ambiente – todo o calor trocado ocorre apenas entre o ar e a água).

Saturação Adiabática



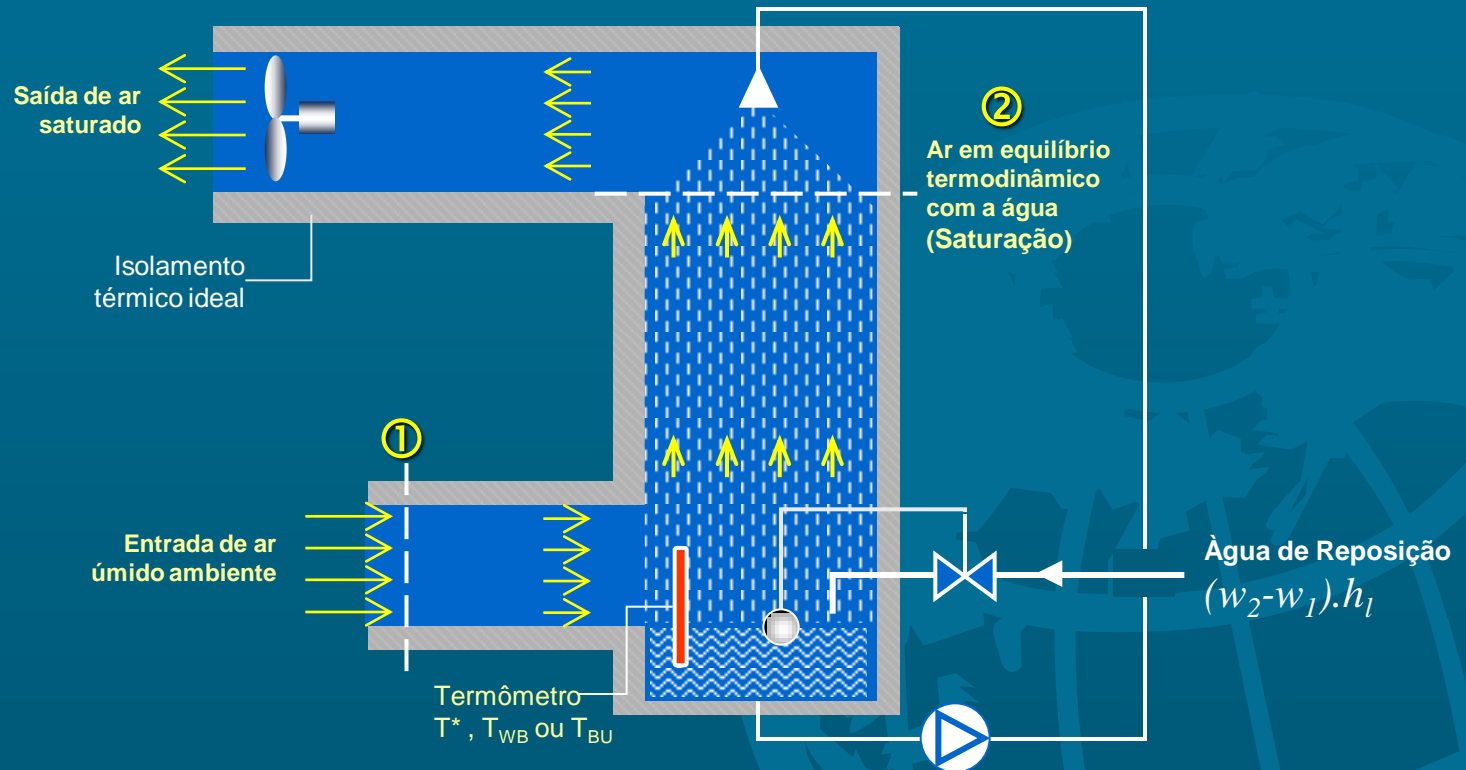
A parcela de água evaporada para a corrente de ar é repostada de forma a manter a operação em regime permanente.

Saturação Adiabática – Temp. de Bulbo Úmido Termodinâmica



Mantida a operação em regime permanente, a temperatura da água lida no termômetro é denominada temperatura de bulbo úmido termodinâmica.

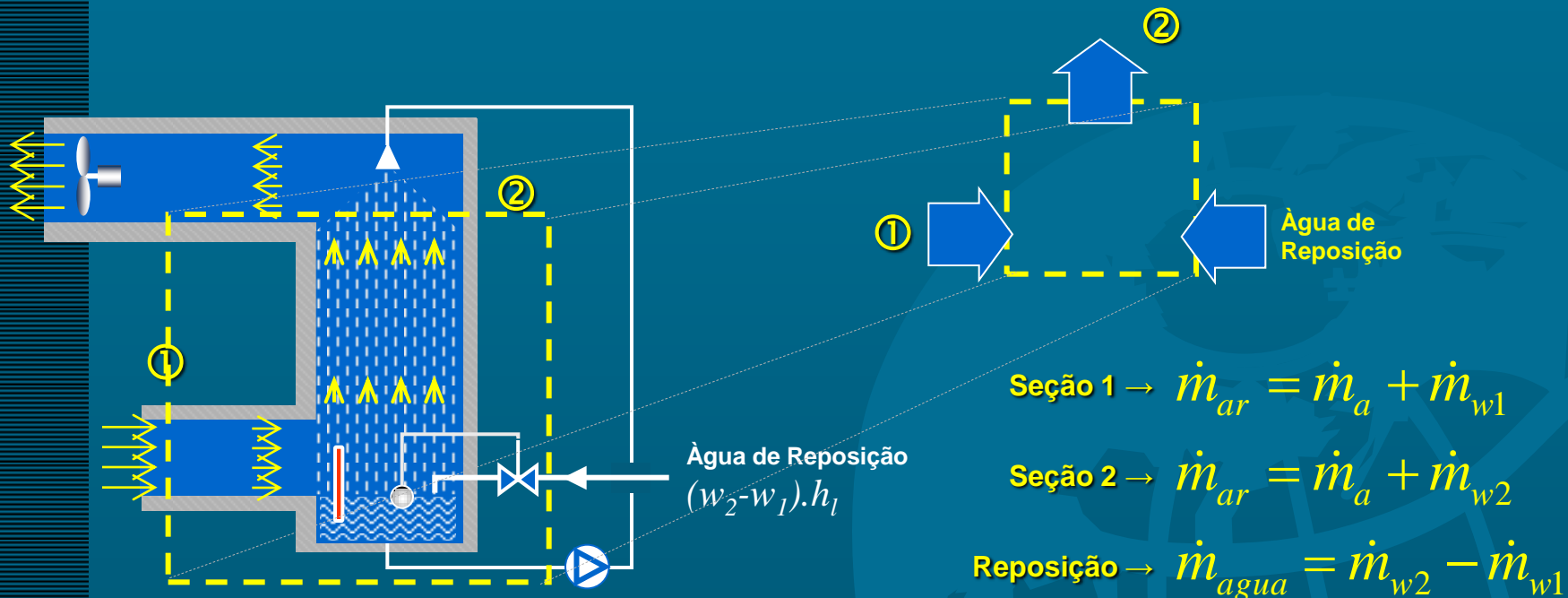
Saturação Adiabática – Temp. de Bulbo Úmido Termodinâmica



Diferentes valores de T_{BU} podem ser obtidos p/ distintos estados do ar na entrada do saturador → Balanço de Energia (1ª Lei da Termodinâmica).

5. Saturação Adiabática e a Tem. de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática – Temp. de Bulbo Úmido Termodinâmica



Da 1ª Lei da Termodinâmica, em regime permanente, temos,

$$\underbrace{\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{w1} h_{w1}}_{H_1} + \underbrace{(\dot{m}_{w2} - \dot{m}_{w1}) h_{\text{água}}^*}_{H_{\text{REPOSIÇÃO}}} = \underbrace{\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{w2} h_{w2}^*}_{H_2}$$

Saturação Adiabática – Temp. de Bulbo Úmido Termodinâmica

$$\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{w1} h_{w1} + (\dot{m}_{w2} - \dot{m}_{w1}) h_{\text{água}}^* = \dot{m}_a h_{a2}^* + \dot{m}_{w2} h_{w2}^*$$

Como \dot{m}_a é constante através do saturador, essa equação pode ser dividida termo a termo por esse valor e, com a definição da umidade absoluta, $w = \dot{m}_w / \dot{m}_a$ temos,

$$h_{a1} + w_1 h_{w1} + (w_2^* - w_1) h_{\text{água}}^* = h_{a2}^* + w_2^* h_{w2}^*$$

Nesta última equação as entalpias se referem a massa de fluido correspondente, mas podem ser referidas a massa de ar seco, levando a ,

$$h_1 + (w_2^* - w_1) h_{\text{água}}^* = h_2^*$$

O asterisco nas equações precedentes lembra que a água de reposição e a corrente de ar que deixa o saturador estão a mesma temperatura T^* .

Saturação Adiabática – Temp. de Bulbo Úmido Termodinâmica

$$h_1 + (w_2^* - w_1)h_{água}^* = h_2^*$$

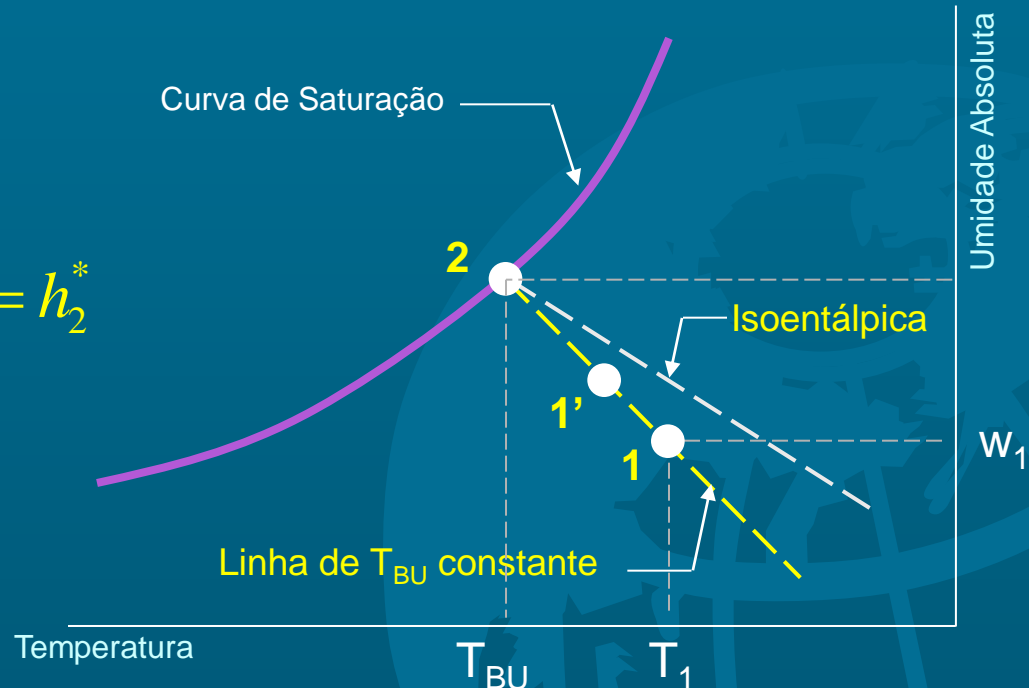
É interessante notar que na equação acima, mantida a pressão constante, as propriedades w_2^* , $h_{água}^*$ e h_2^* são apenas função da temperatura T^* , já que o vapor d'água está saturado.

Isso implica em que T^* é função apenas da entalpia h_1 e da umidade w_1 do fluxo de ar que entra no saturador.

Ou seja, a temperatura T^* depende tão somente do estado termodinâmico do ar que entra no saturador adiabático que é batizada como Temperatura de Bulbo Úmido Termodinâmica (por vezes denominada temperatura de saturação adiabática).

Saturação Adiabática – Temp. de Bulbo Úmido Termodinâmica

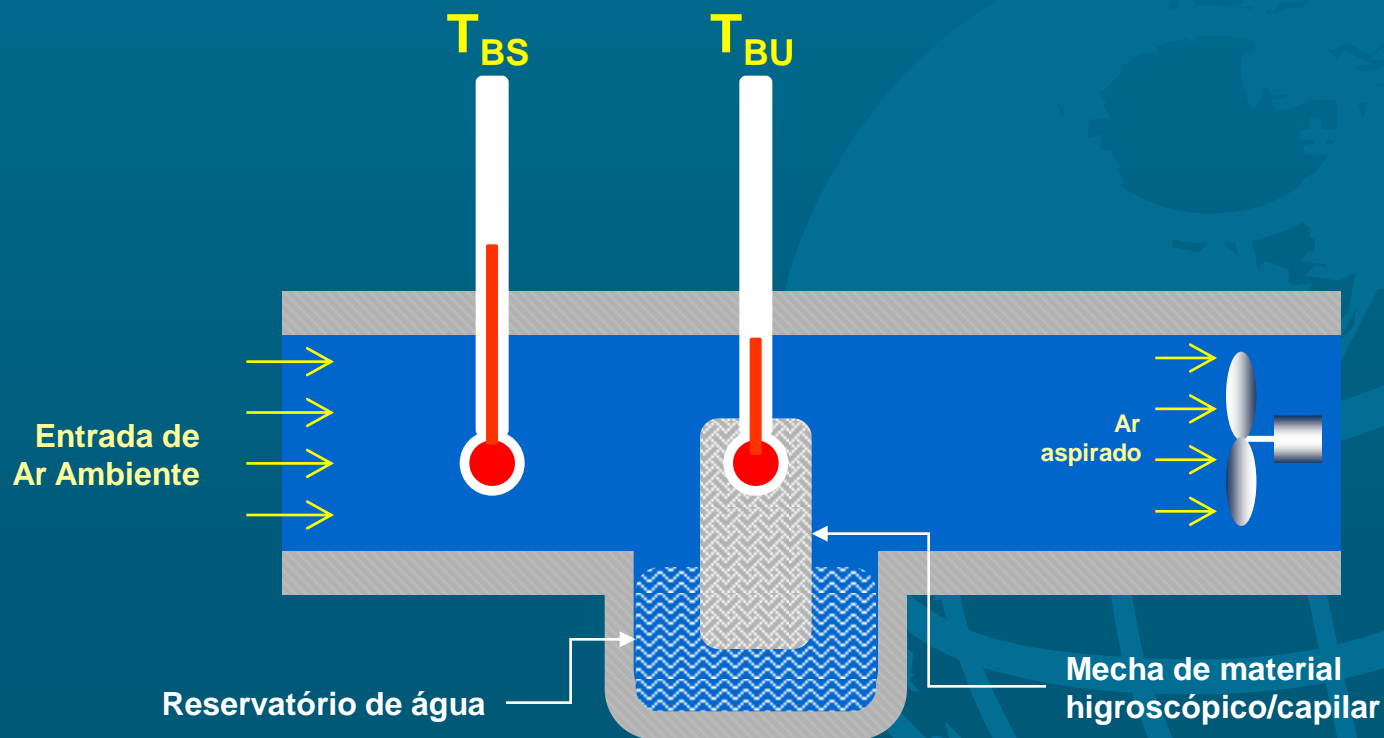
$$h_1 + (w_2^* - w_1)h_{\text{água}}^* = h_2^*$$



Nota: Se a água no saturador estiver no estado sólido, ao invés de líquido, a análise permanece válida bastando substituir a entalpia da água líquida $h_{\text{água}}$ pela entalpia da água sólida.

O Psicrômetro e a Temperatura de bulbo úmido

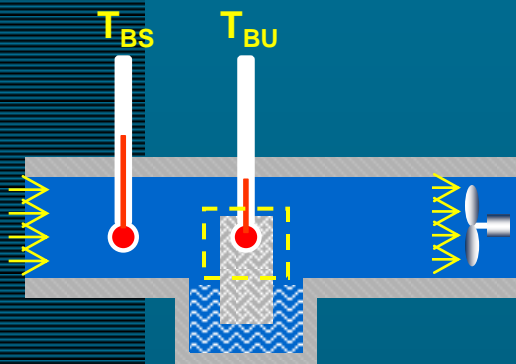
O psicrômetro é o instrumento largamente utilizado para a medição das propriedades do ar úmido. Especificamente esse instrumento fornece medidas diretas das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido.



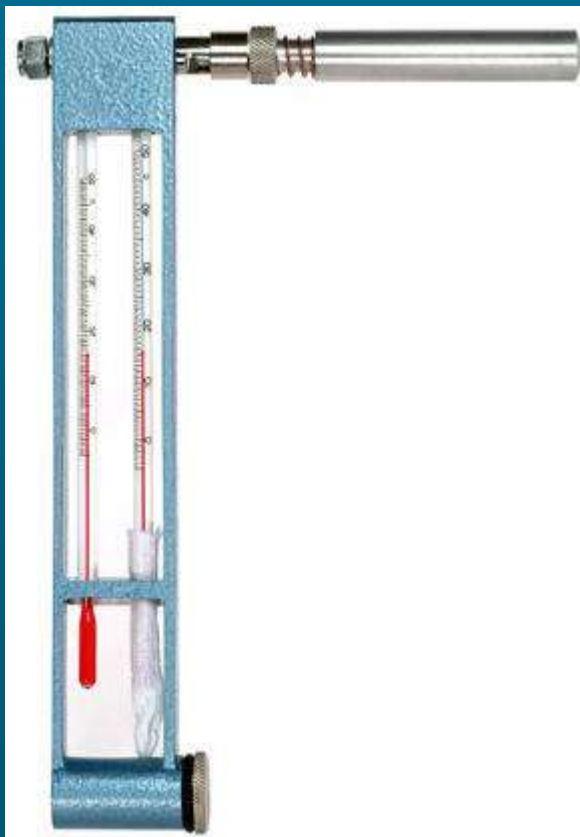
5. Saturação Adiabática e a Tem. de Bulbo Úmido

O Psicrômetro e a Temperatura de bulbo úmido

Abaixo alguns instrumentos comerciais baseados nesse arranjo.



http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/AE_psychrometer.html



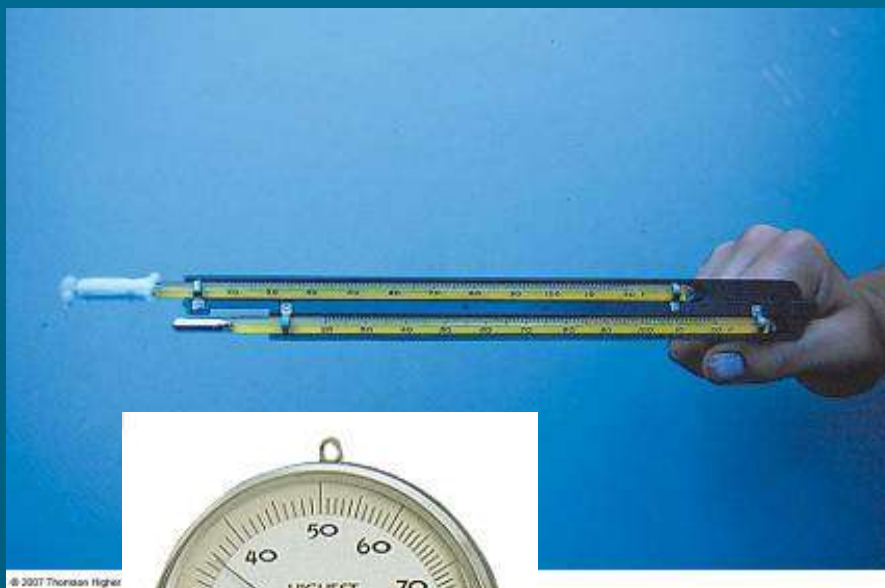
<http://web.mac.com/planeten.paultje/instrumenten/psychrometer.html>



<http://4weather.net/stationhistory.html>

O Psicrômetro e a Temperatura de bulbo úmido

Abaixo alguns instrumentos comerciais baseados nesse arranjo.



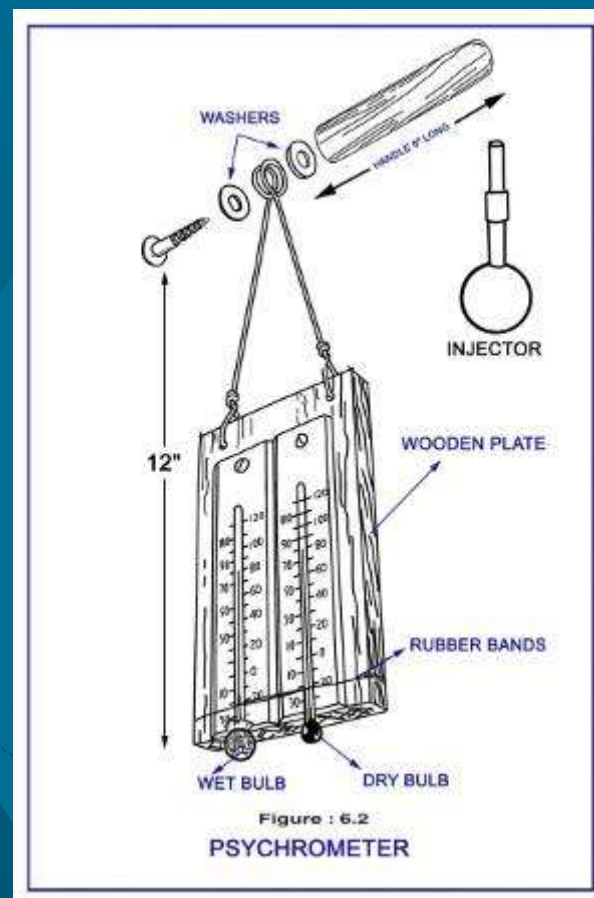
© 2007 Thomson Higher



HAIR HYGROTHERMOMETER

<http://www.sksato.co.jp/english/text/7540-00.html>

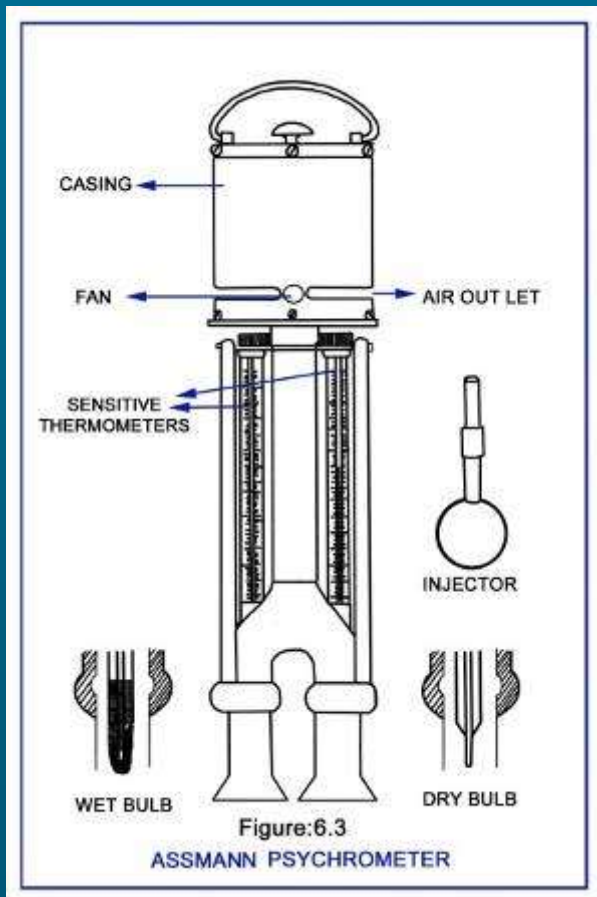
/notes/chapter4/sling.html



<http://www.agrometeorology.org/index.php?id=38>

O Psicrômetro e a Temperatura de bulbo úmido

ASSMANN TYPE PSYCHROMETER



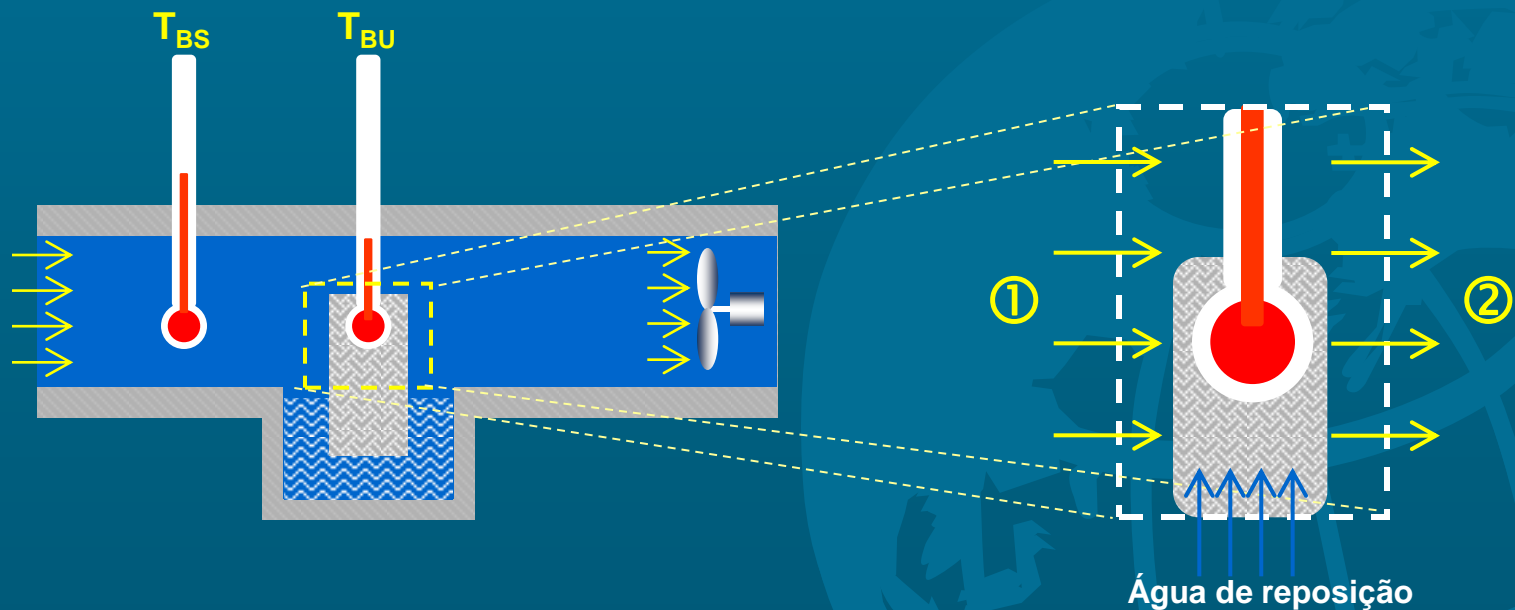
<http://www.agrometeorology.org/index.php?id=38>



<http://www.sksato.co.jp/english/text/7450-00.html>

O Psicrômetro e a Temperatura de bulbo úmido

Um processo simultâneo de transferência de calor e massa ocorre em torno da mecha úmida. Parte da água na mecha se evapora causando uma redução da temperatura do bulbo do termômetro de T_{BU} .

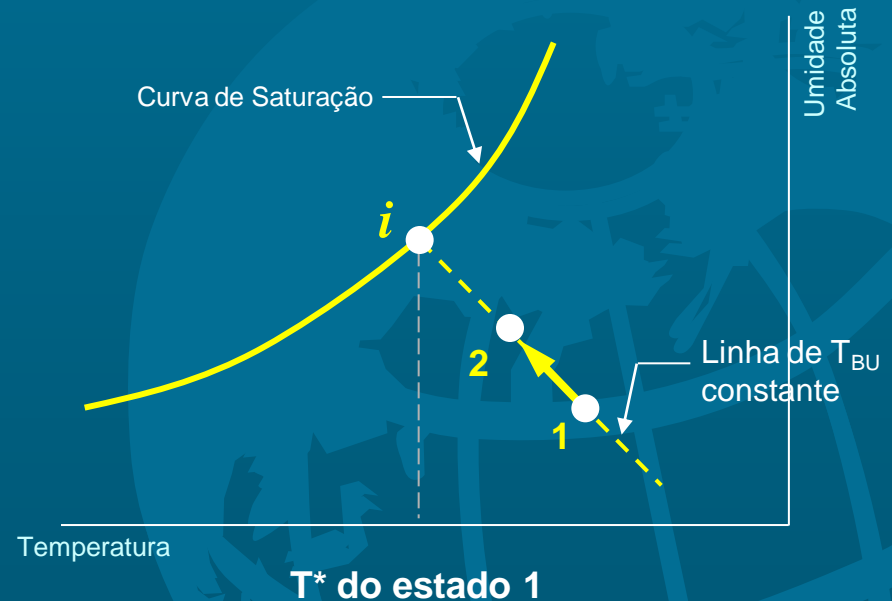
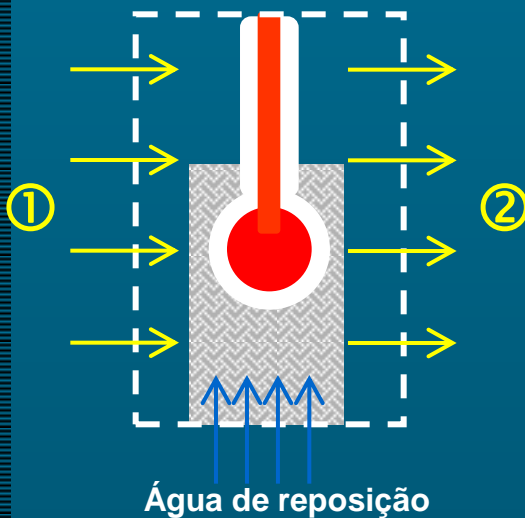


Uma espécie de equilíbrio termodinâmico se estabelece onde o calor cedido da corrente de ar para a mecha é usado para evaporar a água da mecha.

5. Saturação Adiabática e a Tem. de Bulbo Úmido

O Psicrômetro e a Temperatura de bulbo úmido

Uma vez em regime permanente o termômetro úmido indicará a temperatura de equilíbrio, isto é a temperatura de bulbo úmido T_{BU} .



A velocidade da corrente de ar deve ser da ordem de 3 a 5 m/s

T_{BU} X Temperatura de bulbo úmido termodinâmica

Até que ponto a temperatura medida pelo psicrometro (T_{BU}) é uma boa representação da temperatura de bulbo úmido *termodinâmica* ??

Temperatura de bulbo úmido *termodinâmica* → decorre de uma condição de equilíbrio termodinâmico num processo ideal de saturação adiabática → trata-se de uma propriedade termodinâmica do ar.

Temperatura de bulbo úmido → resulta de um processo de equilíbrio dinâmico de na transferência simultânea de calor e massa dependente de vários fatores, como a velocidade do ar, a geometria do bulbo, etc.

A área da mecha é finita e as condições de transferência de calor e massa não são ideais (como no saturador adiabático) → → A temperatura do ar varia de T_1 a $T_2 > T_1$ (gráfico anterior).

Qual a aproximação da temperatura da água na mecha (medida pelo termômetro, T_{BU}) da temperatura de bulbo úmido *termodinâmica* ?? Qual o erro cometido ??

T_{BU} X Temperatura de bulbo úmido termodinâmica

Qual a aproximação da temperatura da água na mecha (medida pelo termômetro, T_{BU}) da temperatura de bulbo úmido *termodinâmica* ?? Qual o erro cometido ??

Carrier (1911) → admitiu não haver diferença.

Lewis (1922) → agrupou variáveis psicrométricas formando um novo grupo adimensional (Número de Lewis) concluindo que se esse adimensional fosse unitário, a hipótese de Carrier estaria correta.

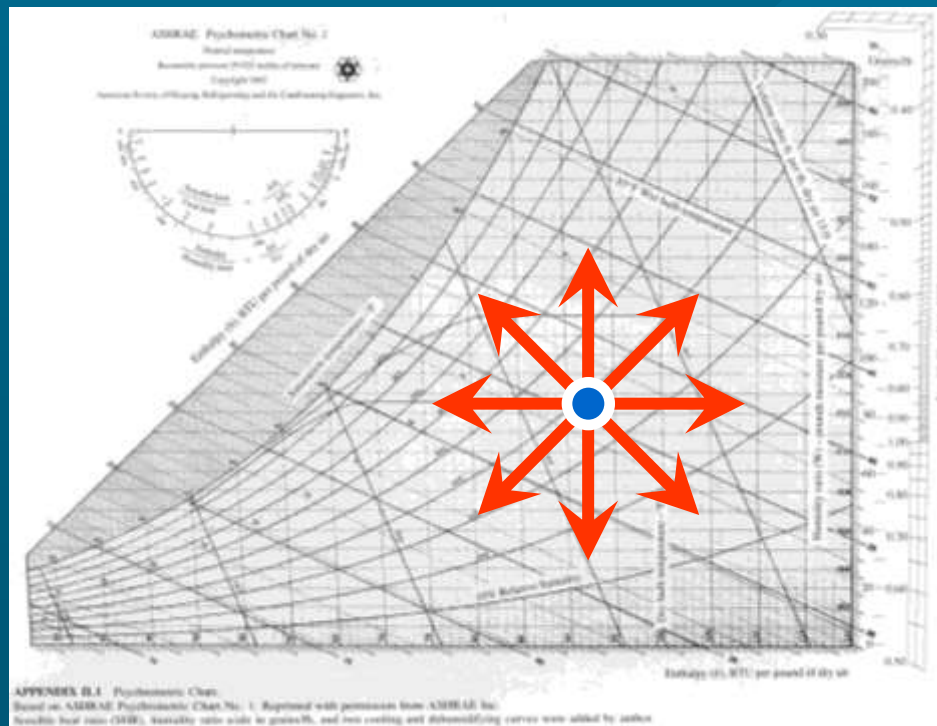
Experimentos posteriores → mostraram que, na maioria das condições normais de uso, é possível considerar que a temperatura da mecha úmida corresponde a temperatura de bulbo úmido termodinâmica → mcorreções são em geral pequenas e podem ser desprezadas.

6

Processos Básicos de Condicionamento do Ar

6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

Uma série de processo de tratamento do ar de interesse pode ser representado e analisado com o auxílio da carta psicrométrica.



6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

Aquecimento / Resfriamento Sensível

A temperatura de bulbo seco (T_{BS}) varia enquanto a umidade absoluta (w) permanece constante.

Umidificação / Desumidificação

A umidade absoluta varia a T_{BS} constante (processo latente)

Resfriamento e Desumidificação

Tanto T_{BS} quanto w diminuem (serpentinas de resfriamento)

Aquecimento e Umidificação

Tanto T_{BS} quanto w aumentam.

Desumidificação Química

A umidade contida no ar é absorvida ou adsorvida por alguma substância higroscópica (em geral ocorre a temperatura constante).

Resfriamento Evaporativo

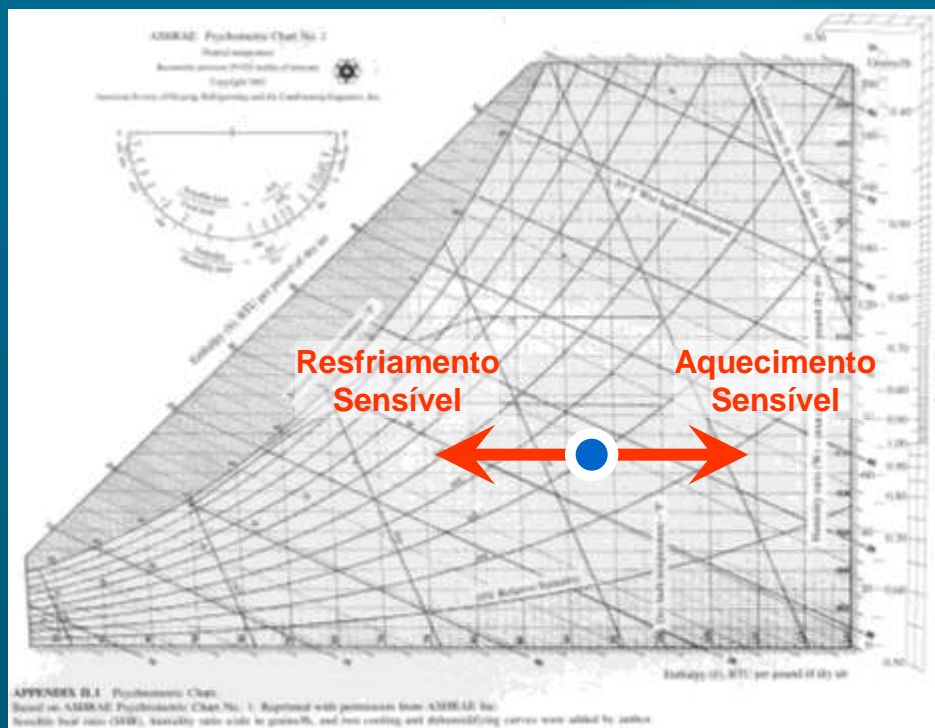
Transferência de calor adiabática na qual T_{BU} permanece constante enquanto T_{BS} diminui e w aumenta.

Mistura Adiabática

Duas correntes de ar úmido em estados distintos são misturadas gerando um novo estado.

Aquecimento / Resfriamento Sensível

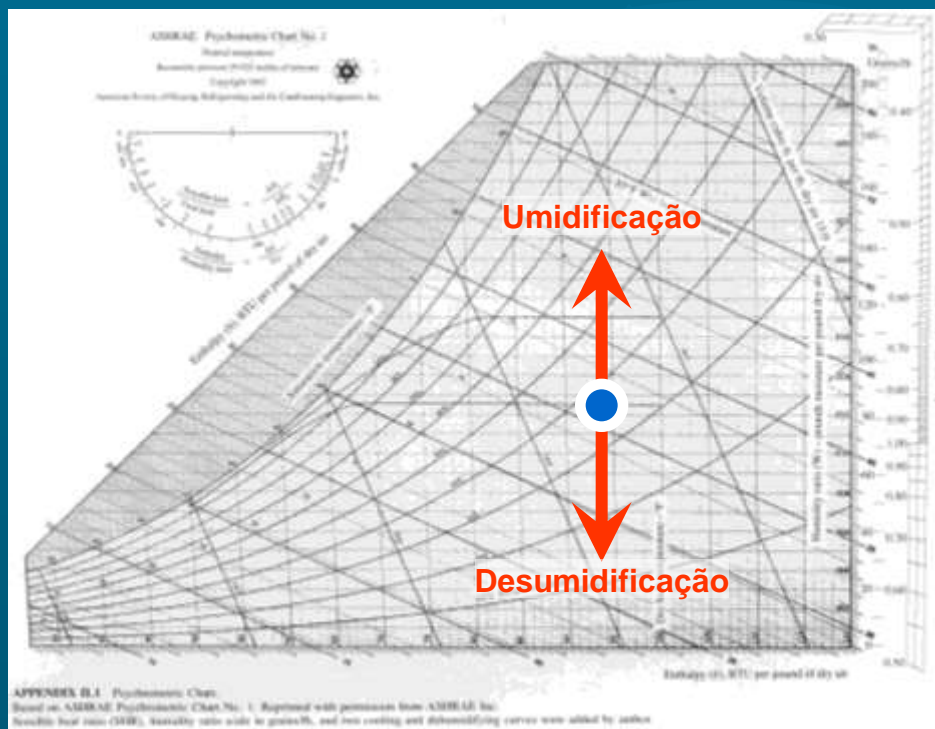
A temperatura de bulbo seco varia enquanto a umidade absoluta permanece constante.



6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

Umidificação / Desumidificação

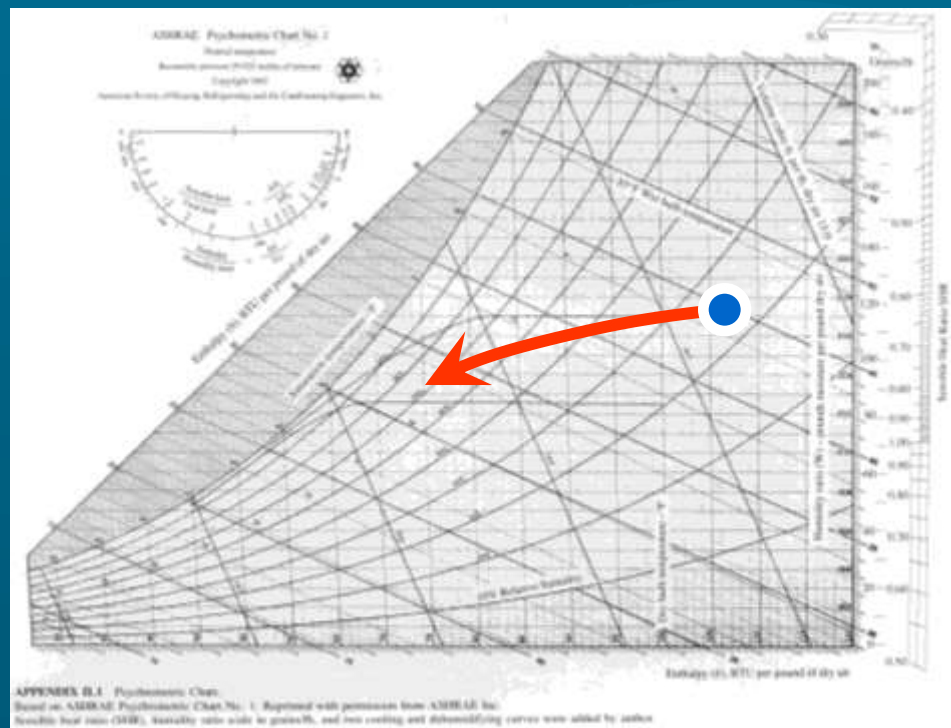
A umidade absoluta varia a temperatura de bulbo seco constante (processo latente)



6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

Resfriamento e Desumidificação

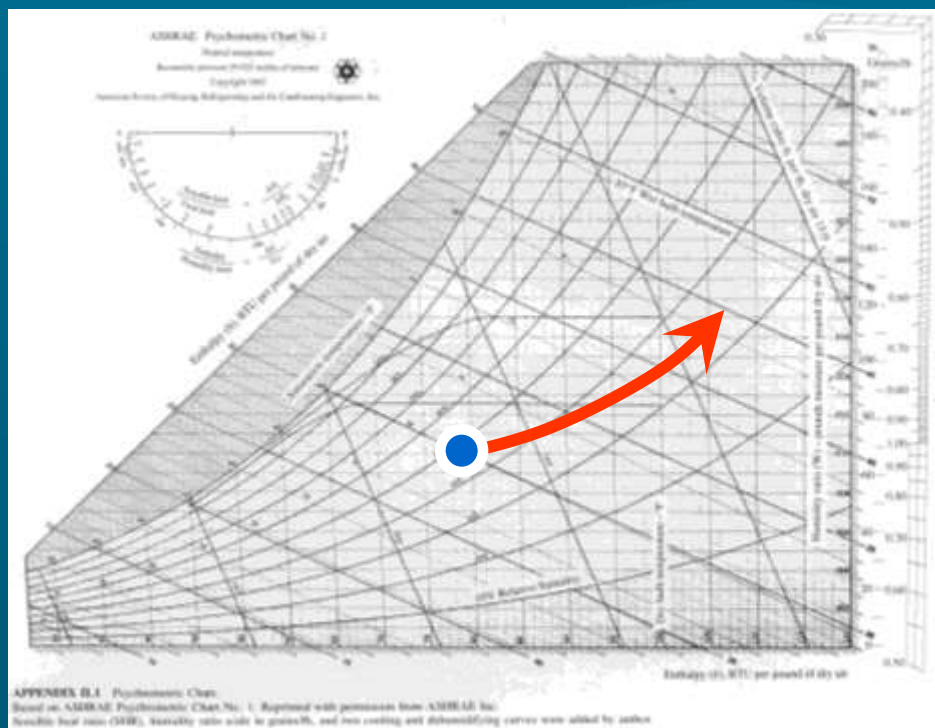
Tanto a temperatura de bulbo seco quanto a umidade absoluta diminuem (serpentinhas de resfriamento)



6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

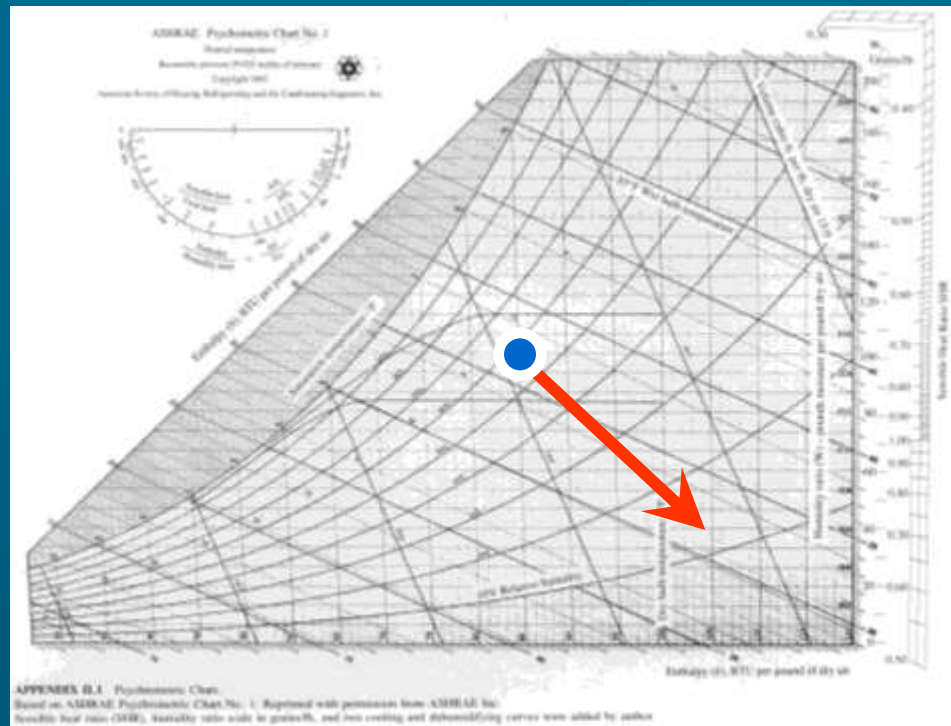
Aquecimento e Umidificação

Tanto a temperatura de bulbo seco quanto a umidade absoluta aumentam.



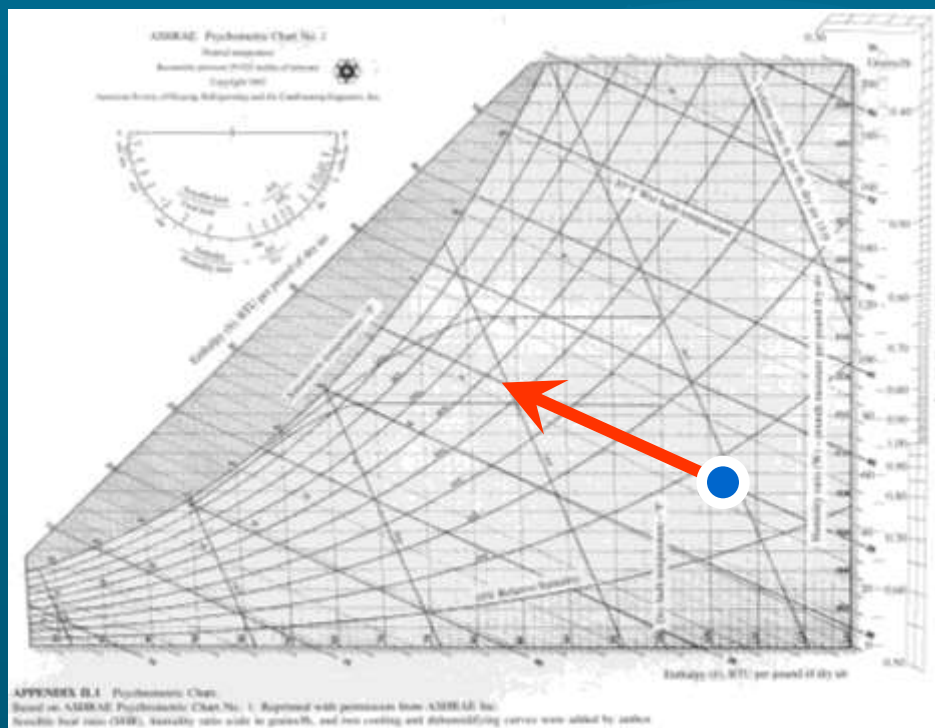
Desumidificação Química

A umidade contida no ar é absorvida ou adsorvida por alguma substância higroscópica (em geral ocorre a temperatura constante).



Resfriamento Evaporativo

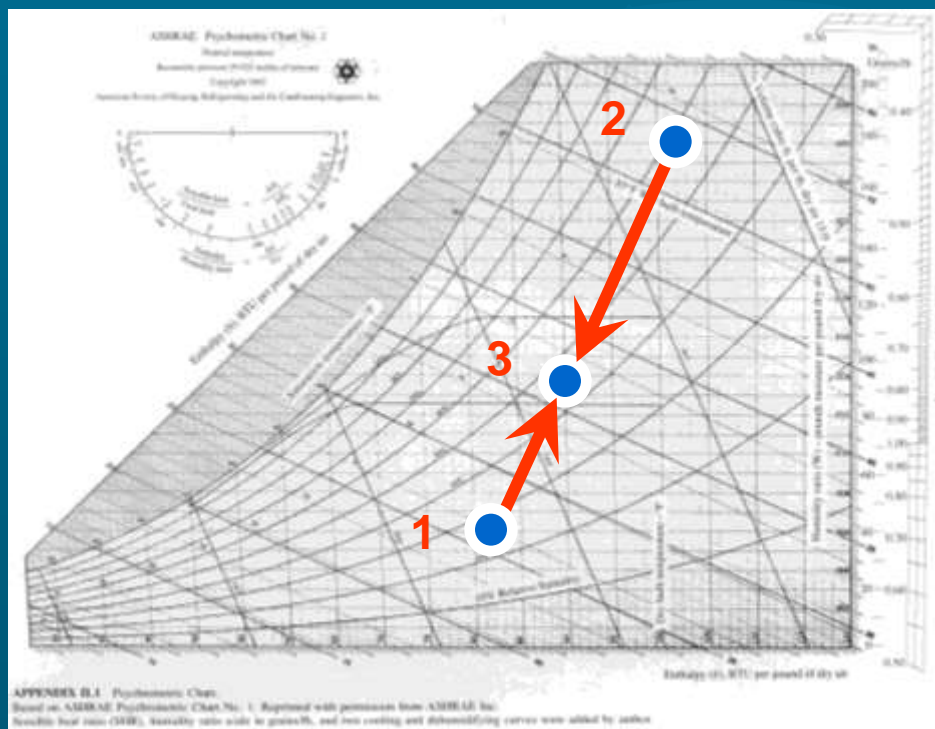
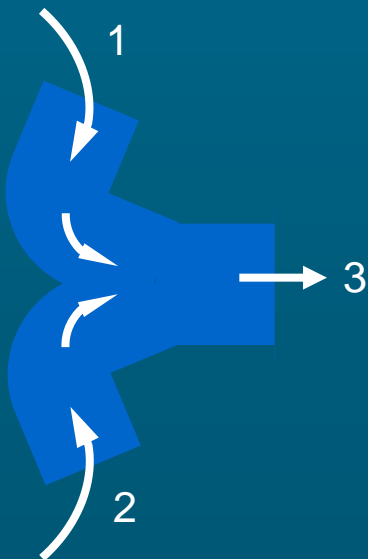
Transferência de calor adiabática na qual TBU permanece constante enquanto T_{BS} diminui e W aumenta.



6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

Mistura Adiabática

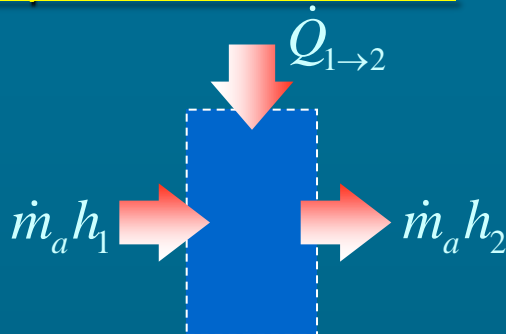
Duas correntes de ar úmido em estados distintos são misturadas gerando um novo estado.



Detalharemos agora a análise de alguns desses processos, segundo os princípios de conservação de energia e massa, apresentando em seguida exemplos numéricos de solução.

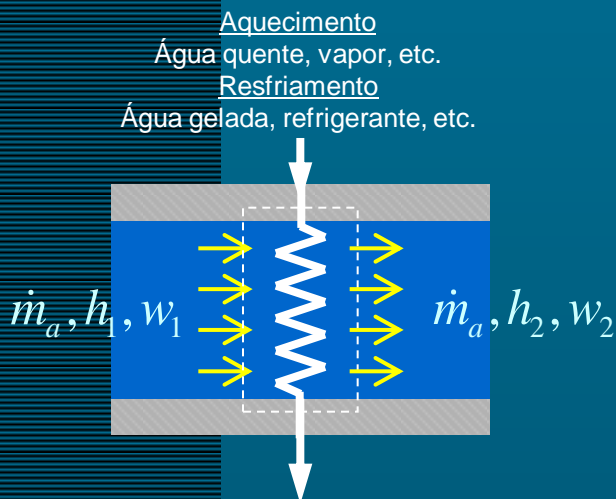
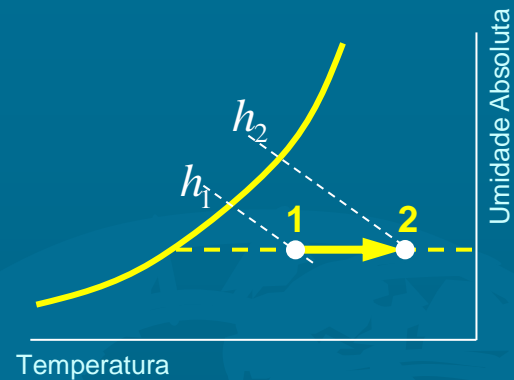
6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

Aquecimento Sensível

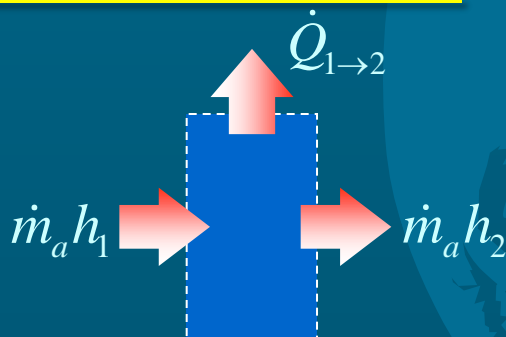


Em regime permanente temos,

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \dot{m}_a (h_2 - h_1)$$

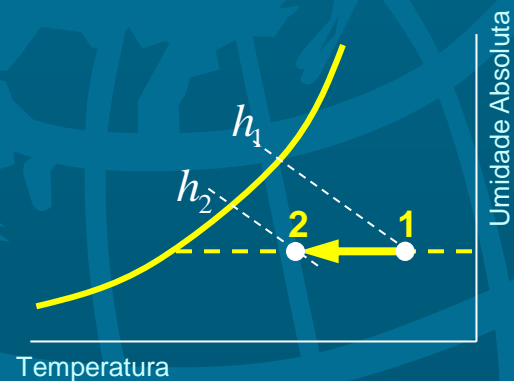


Resfriamento Sensível



Em regime permanente temos,

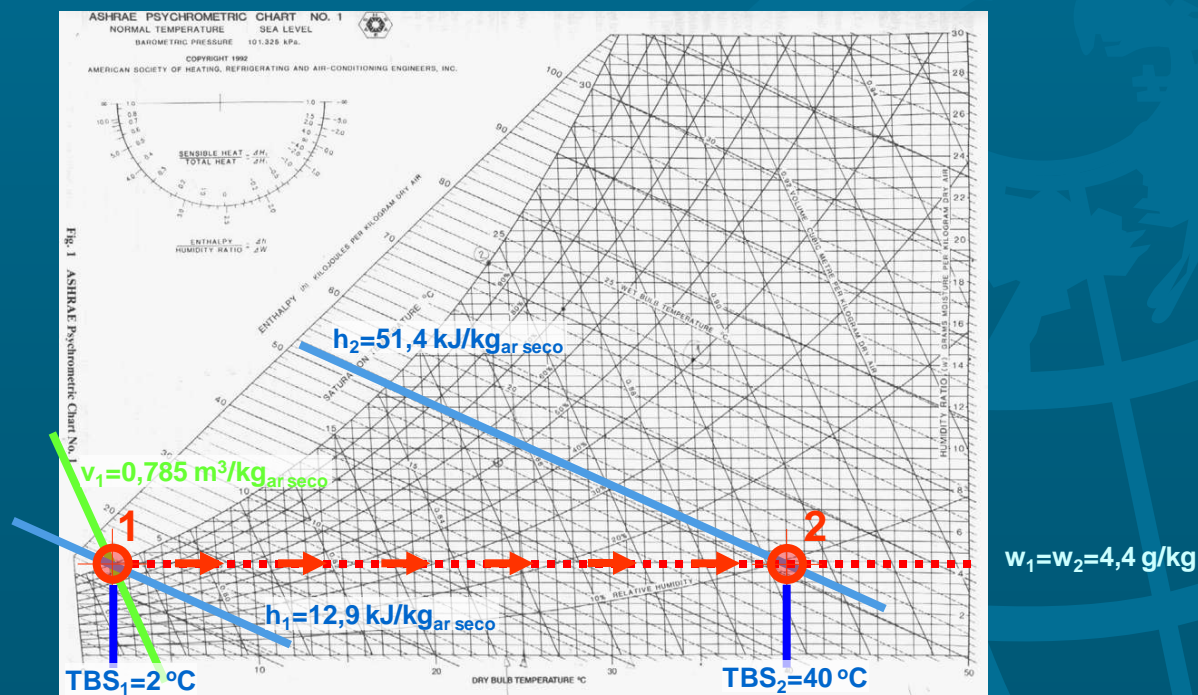
$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \dot{m}_a (h_1 - h_2)$$



6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar**Exemplo**

Ar úmido saturado a $T_{BS} = 2\text{ °C}$ atravessa um aquecedor com vazão de 3000 m^3/h . Após a serpentina de aquecimento deseja-se obter uma temperatura de 40 °C . Calcule a potência térmica necessária para a fonte de calor.

Inicialmente representamos o processo na carta psicrométrica.



Exemplo

continuação

Da carta psicrométrica (ou tabela) o estado dos pontos 1 e 2 será:

Ponto 1: Com $T_{BS} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 100\%$ (saturado), temos:

$$h_1 = 12,982 \text{ kJ/kg}_{\text{ar seco}} \quad v_1 = 0,785 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{ar seco}} \quad w_1 = 4,4 \text{ g/kg}_{\text{ar seco}}$$

Ponto 2: Com $T_{BS} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $w_2 = w_1 = 4,4 \text{ g/kg}$, temos:

$$h_2 = 51,4 \text{ kJ/kg}_{\text{ar seco}}$$

A vazão mássica de ar seco é calculada por,

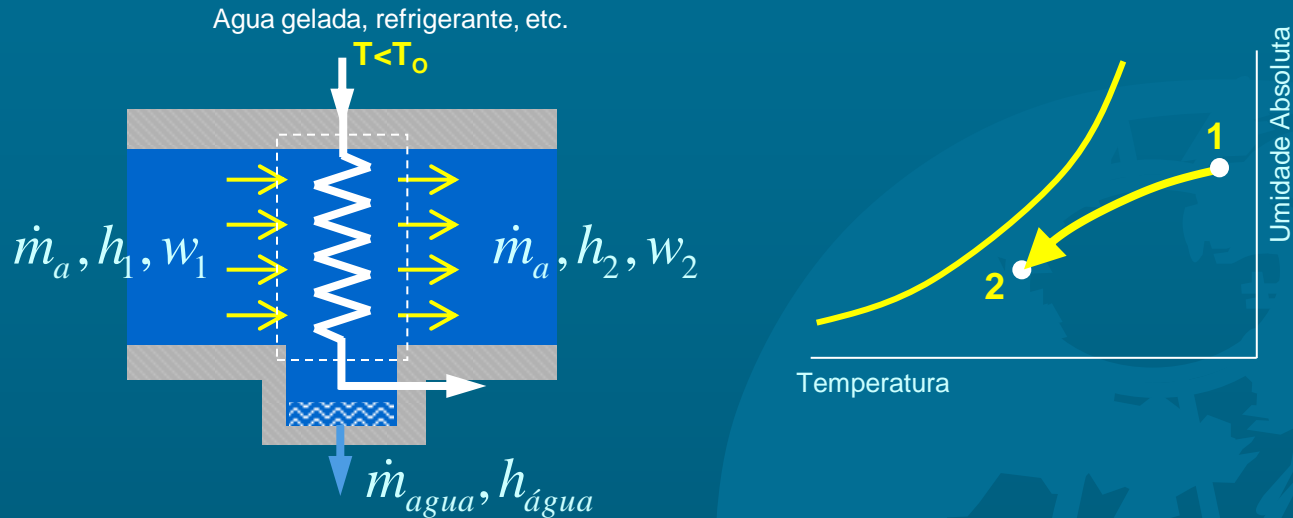
$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_1} \rightarrow \left[\frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{m}^3/\text{kg}_{\text{ar seco}}} \right] \rightarrow \left[\frac{\text{kg}_{\text{ar seco}}}{\text{h}} \right]$$

$$\dot{m}_a = \frac{3000}{0,785} = 3822 \frac{\text{kg}_{\text{ar seco}}}{\text{h}}$$

Finalmente, na equação do balanço energético, vem,

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) = 3822 (51,4 - 12,5) = 148,7 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} = 41,3 \text{ kW}$$

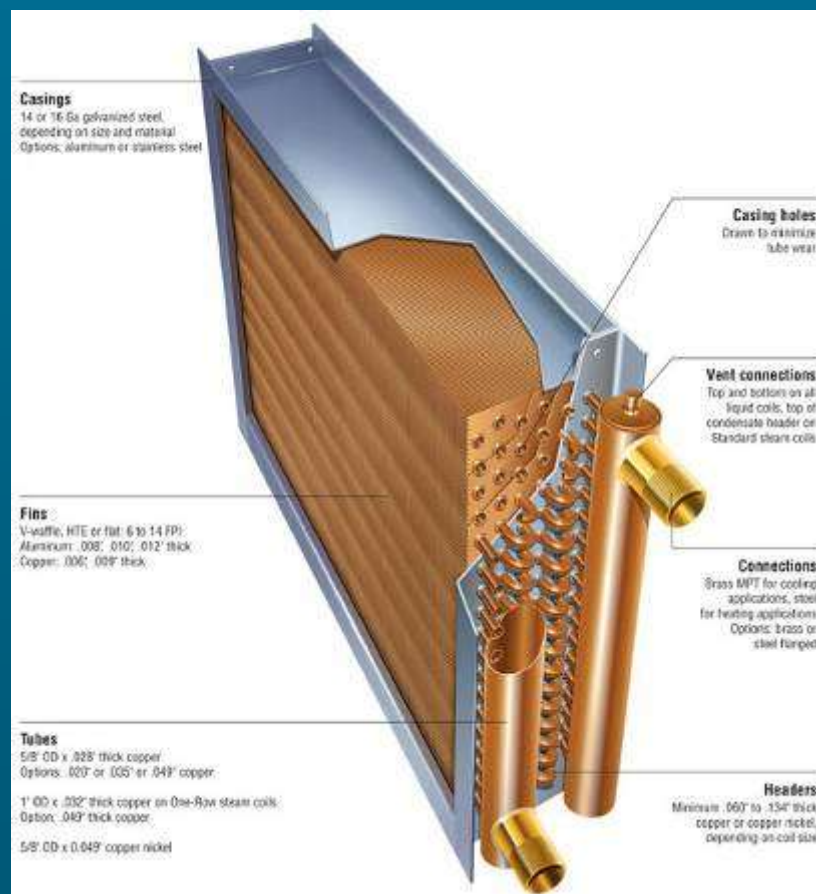
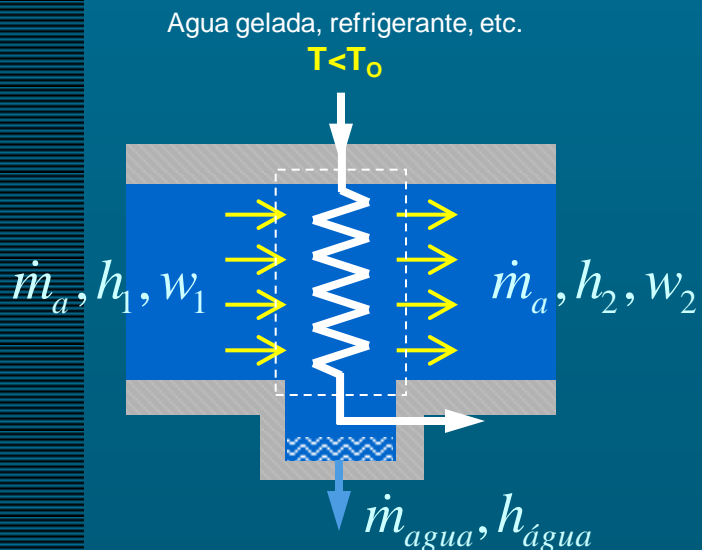
Resfriamento e desumidificação do ar úmido



O resfriamento do ar úmido a uma temperatura inferior a sua temperatura de orvalho resulta na condensação do vapor d'água contido no ar.

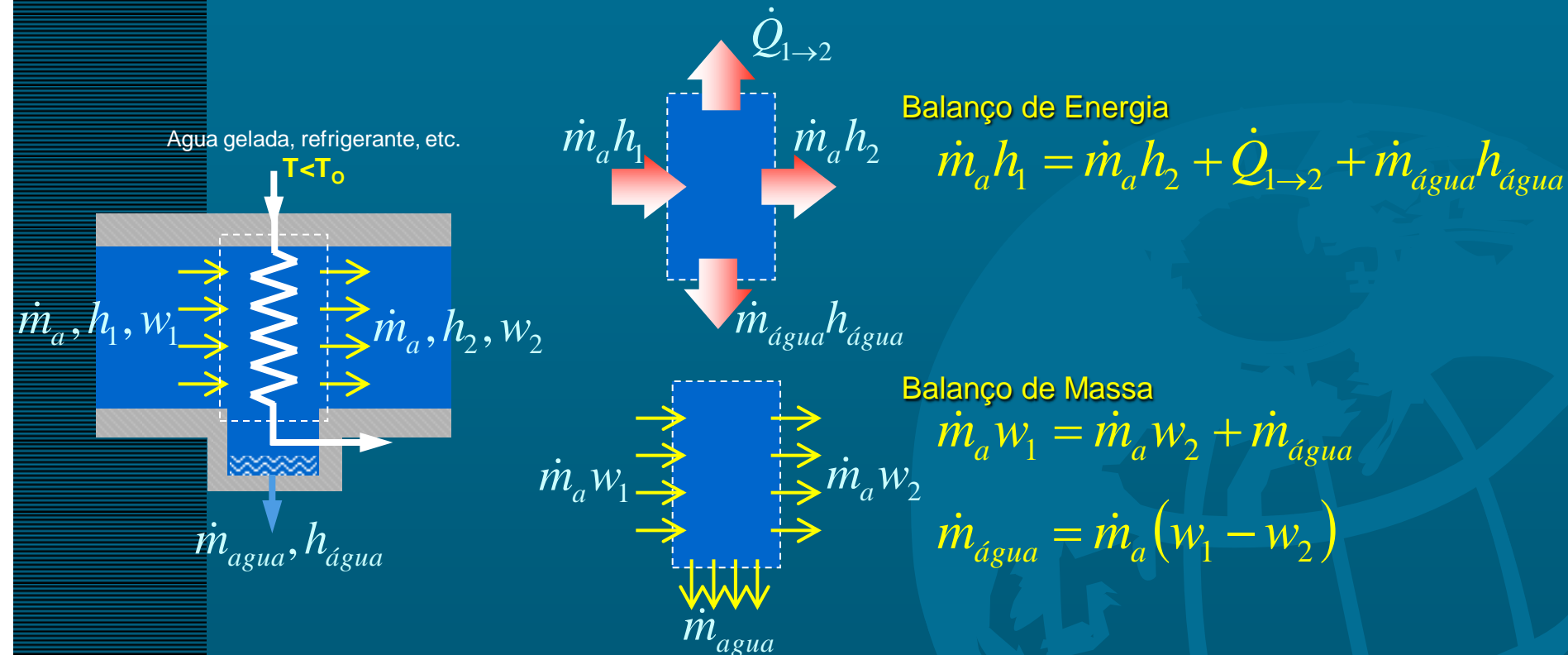
Embora a água possa ser separada numa faixa de temperaturas entre o ponto de orvalho e a temperatura final de condensação, assume-se que a água condensada é resfriada até a temperatura final T_2 , sendo em seguida drenada.

Resfriamento e desumidificação do ar úmido



<http://www.armstrong-hunt.com/heating-cooling-coils-plate-fin>

6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

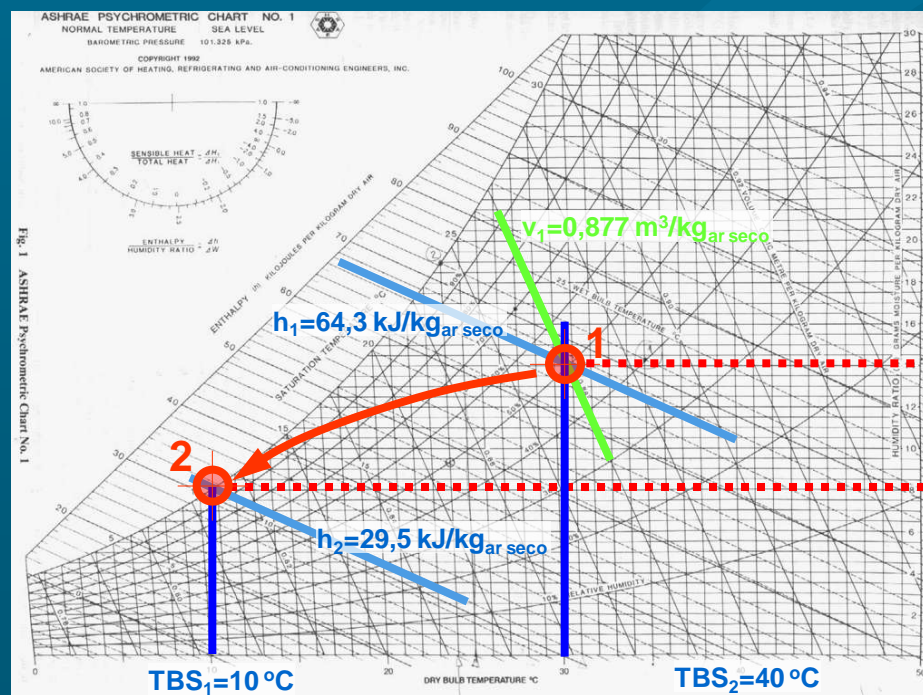
Resfriamento e desumidificação do ar úmido

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \dot{m}_a [(h_1 - h_2) - (w_1 - w_2) h_{\text{agua}}]$$

6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar**Exemplo**

Ar úmido a $T_{BS} = 30\text{ °C}$ e 50% UR atravessa uma serpentina de resfriamento numa vazão de $17.000\text{ m}^3/\text{h}$, sendo resfriado até um estado final saturado a 10 °C . Calcule a potência frigorífica do sistema de refrigeração.

Inicialmente representamos o processo na carta psicrométrica.

 $w_1 = 13,3\text{ g/kg}$ $w_2 = 7,6\text{ g/kg}$

Exemplo

continuação

Da carta psicrométrica (ou tabela) o estado dos pontos 1 e 2 será:

Ponto 1: Com $T_{BS} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR=50\%$ (saturado), temos:

$$h_1 = 64,3 \text{ kJ/kg}_{\text{ar seco}} \quad v_1 = 0,877 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{ar seco}} \quad w_1 = 13,3 \text{ g/kg}_{\text{ar seco}}$$

Ponto 2: Com $T_{BS} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $UR=100\%$, temos:

$$h_2 = 29,5 \text{ kJ/kg}_{\text{ar seco}} \quad w_2 = 7,6 \text{ g/kg}_{\text{ar seco}}$$

A vazão mássica de ar seco é calculada por,

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_1} \rightarrow \left[\frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{m}^3/\text{kg}_{\text{ar seco}}} \right] \rightarrow \left[\frac{\text{kg}_{\text{ar seco}}}{\text{h}} \right]$$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_1} = \frac{17000}{0,877} = 19.384 \frac{\text{kg}_{\text{ar seco}}}{\text{h}}$$

Exemplo

continuação

Agora, antes de aplicar a equação do balanço de energia e massa para este processo, precisamos ainda determinar a entalpia da água líquida saturada drenada do saturador. Temos,

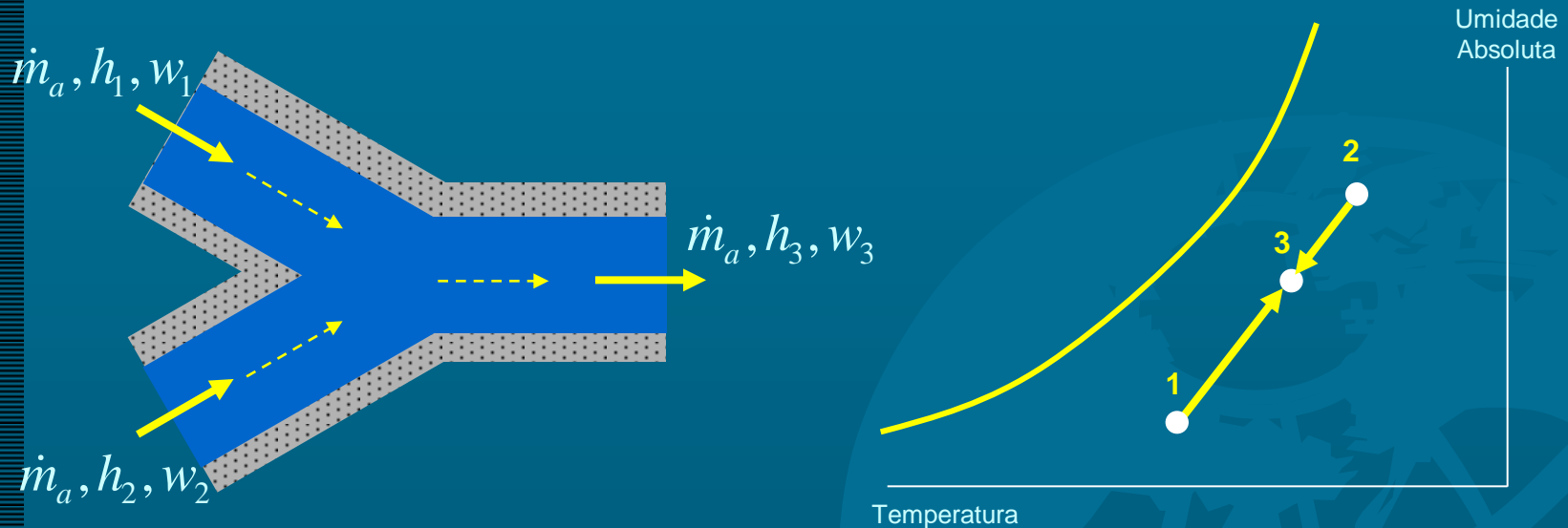
Pressão T °C	P kPa	Volume Específico m³/kg			Entalpia Específica kJ/kg			T °C
		v_L	v_{LV}	v_V	h_L	h_{LV}	h_V	
0,01	0,6113	0,00100	206,14	206,14	0,01	2501,4	2501,4	0,01
5	0,8721	0,00100	147,12	147,12	20,98	2489,6	2510,6	5
10	1,2276	0,00100	106,38	106,38	42,01	2477,8	2519,8	10
15	1,7051	0,00100	77,93	77,93	62,99	2465,9	2528,9	15
20	2,339	0,00100	57,79	57,79	83,96	2454,1	2538,1	20
25	3,169	0,00100	43,36	43,36	104,89	2442,3	2547,2	25
30	4,246	0,00100	32,89	32,89	125,79	2430,5	2556,3	30

Finalmente, temos

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \dot{m}_a [(h_1 - h_2) - (w_1 - w_2) h_{\text{água}}]$$

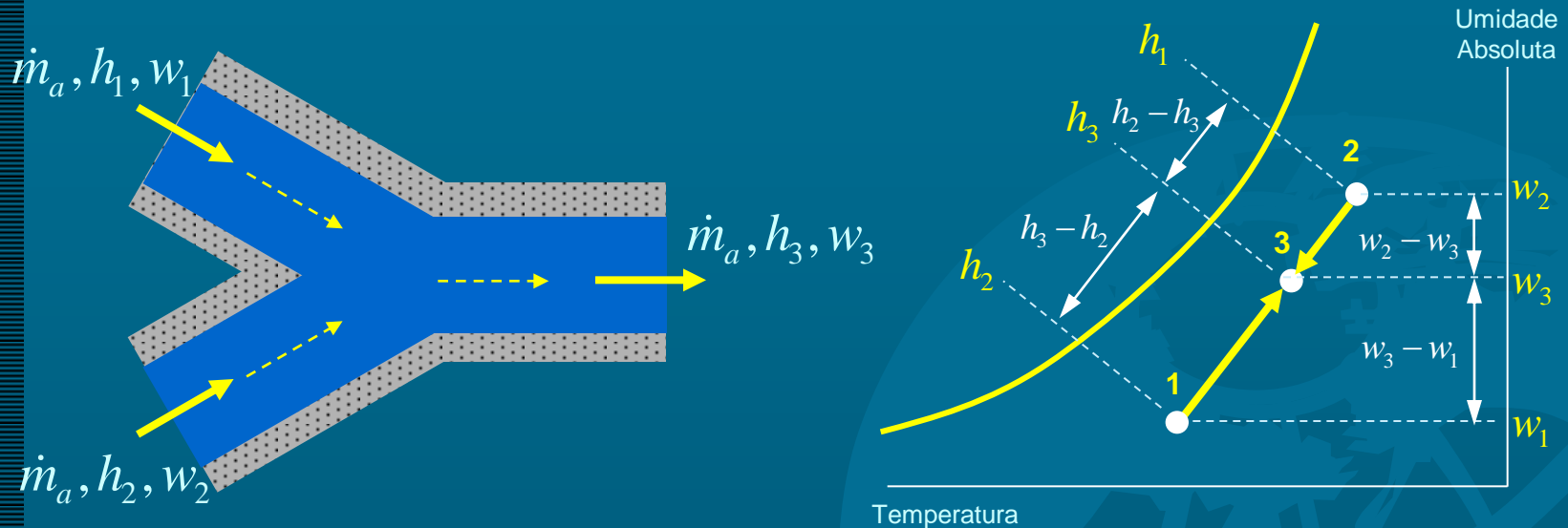
$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = 19.384 [(64,3 - 29,5) - (0,0133 - 0,0076) 42,01] = 675 \frac{MJ}{h} = 187 kW$$

Mistura Adiabática de Duas Correntes de Ar Úmido



Trata-se de um processo comum em aplicações de ar condicionado, cujo exemplo mais representativo refere-se a mistura do ar de retorno com o ar de renovação.

Aplicando balanços de massa e de energia temos ...

6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar**Mistura Adiabática de Duas Correntes de Ar Úmido****Balço de energia**

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a h_2 = \dot{m}_a h_3$$

Balço de massa de ar seco

$$\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_{a,3}$$

Balço de massa de vapor d'água

$$\dot{m}_{a,1} w_1 + \dot{m}_{a,2} w_2 = \dot{m}_{a,3} w_3$$

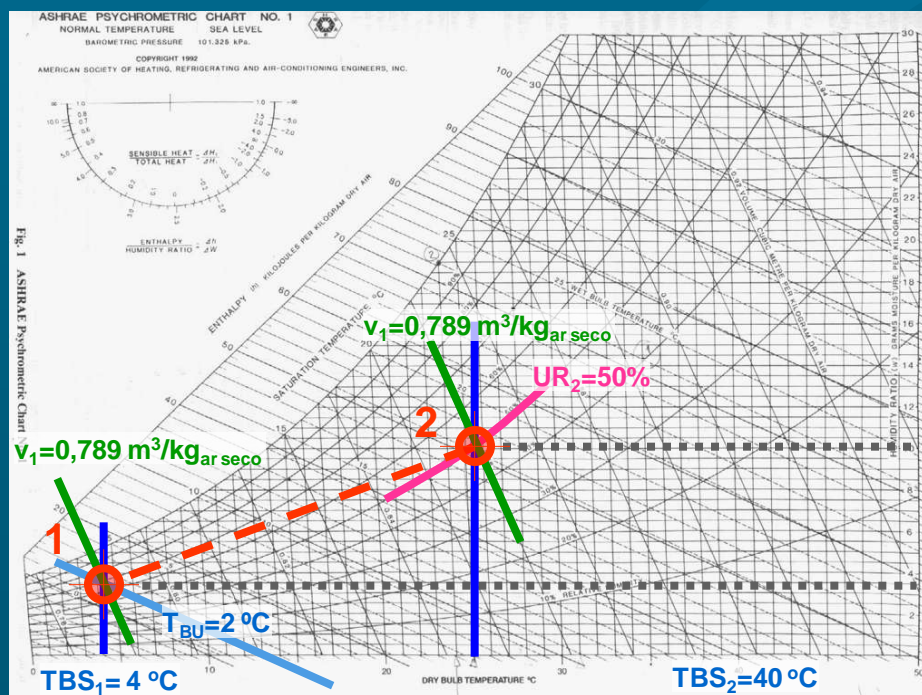
Eliminando $\dot{m}_{a,3}$, podemos escrever,

$$\frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} = \frac{\dot{m}_{a,1}}{\dot{m}_{a,2}}$$

6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar**Exemplo**

Uma corrente de 8000 m³/h de ar exterior a $T_{BS}= 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{BU}= 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ é misturada adiabaticamente com ar recirculado de um recinto numa vazão de atravessa uma serpentina de resfriamento numa vazão de 25000 m³/h com $T_{BS}= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e UR=50%. Determine T_{BS} e T_{BU} para a mistura resultante.

Inicialmente representamos o processo na carta psicrométrica.



Exemplo

continuação

Com as propriedades obtidas da carta psicrométrica nos pontos 1 e 2 temos,

$$\dot{m}_{a,1} = \frac{\dot{V}_{a,1}}{v_1} = \frac{8000}{0,789} = 10.140 \frac{\text{kg}_{\text{ar seco}}}{\text{h}} \quad \dot{m}_{a,2} = \frac{\dot{V}_{a,2}}{v_2} = \frac{25000}{0,858} = 29.140 \frac{\text{kg}_{\text{ar seco}}}{\text{h}}$$

Assim a razão $\dot{m}_{a,1}/\dot{m}_{a,2}$ é obtida e aplicada na equação anterior como,

$$\frac{\dot{m}_{a,1}}{\dot{m}_{a,2}} = 0,742 = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} \Rightarrow w_3 = \dots\dots \frac{\text{kg}_{\text{vapor}}}{\text{kg}_{\text{ar seco}}}$$

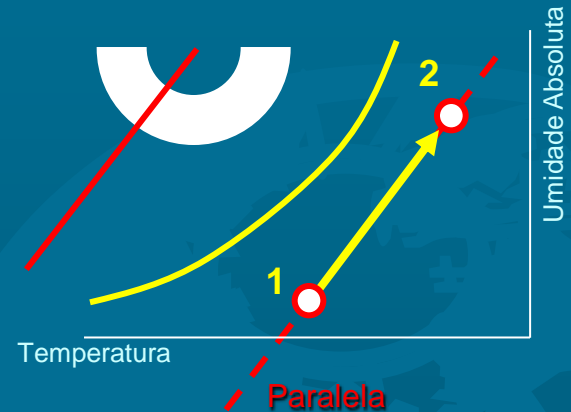
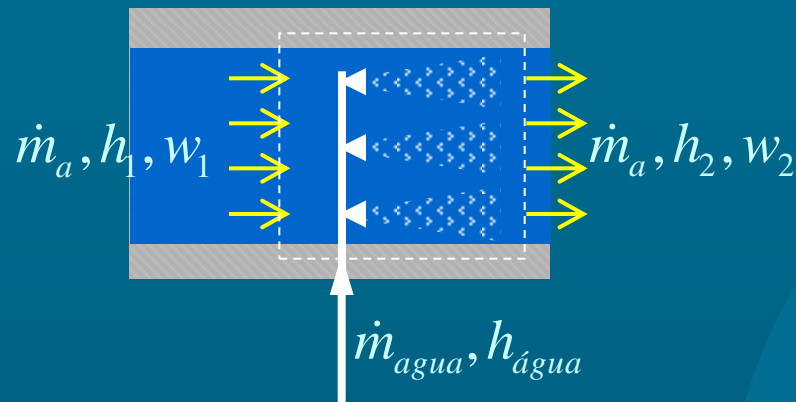
$$\frac{\dot{m}_{a,1}}{\dot{m}_{a,2}} = 0,742 = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} \Rightarrow h_3 = \dots\dots \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{ar seco}}}$$

Então, com os valores de w_3 e h_3 o ponto 3 pode ser posicionado na carta, sobre a linha 1-2, permitindo assim obter

$$T_{BS,3} = 19,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{BU,3} = 14,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

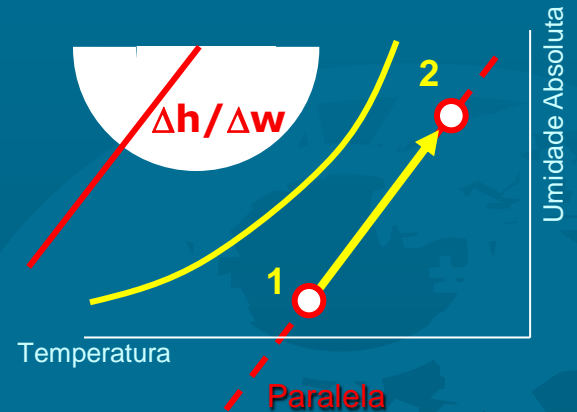
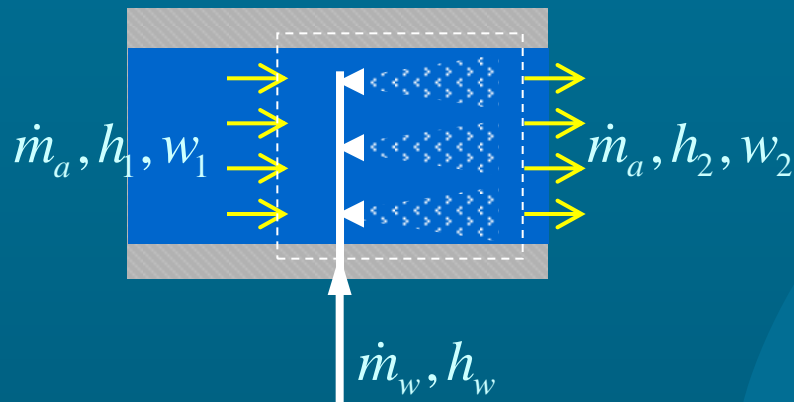
Injeção Adiabática de Água no Ar Úmido



Permite aumentar a umidade do ar pela injeção de vapor d'água ou água líquida na corrente de ar úmido.

A linha que representa o processo possui inclinação plotada de acordo com o transferidos da carta psicrométrica

Aplicando balanços de massa e de energia temos ...

6. Processo Básicos de Condicionamento do ArInjeção Adiabática de Água no Ar Úmido**Balanco de energia**

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_a h_2$$

Balanco de massa de vapor d'água

$$\dot{m}_a w_1 + \dot{m}_w = \dot{m}_a w_2$$

Então,
$$\frac{h_2 - h_1}{w_2 - w_1} = h_w$$

O estado final do ar encontra-se sobre uma reta cuja inclinação $\Delta h / \Delta w$ corresponde a entalpia da água injetada.

6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar**Exemplo**

Ar úmido com $T_{BS} = 20\text{ °C}$ e $T_{BU} = 8\text{ °C}$ é processado para uma temperatura de ponto de orvalho de 13 °C pela injeção de vapor d'água saturado a 110 °C . A vazão de ar seco no processo é de 100 kg/h . Pede-se obter T_{BS} para o estado final do ar úmido e a vazão de vapor necessária.

O estado do ponto 1 é conhecido mas para plotar o processo precisamos antes determinar a entalpia do vapor d'água injetado.

Pressão T °C	P kPa	Volume Específico m^3/kg			Entalpia Específica kJ/kg			T °C
		v_L	v_{LV}	v_V	h_L	h_{LV}	h_V	
0,01	0,6113	0,00100	206,14	206,14	0,01	2501,4	2501,4	0,01
5	0,8721	0,00100	147,12	147,12	20,98	2489,6	2510,6	5
10	1,2276	0,00100	106,38	106,38	42,01	2477,8	2519,8	10
15	1,7051	0,00100	77,93	77,93	62,99	2465,9	2528,9	15
90	70,14	0,00104	2,360	2,361	376,92	2283,2	2660,1	90
95	84,55	0,00104	1,981	1,982	397,96	2270,1	2668,1	95
100	101,325	0,00104	1,672	1,6729	419,04	2257,1	2676,1	100
105	120,82	0,00105	1,418	1,4194	440,15	2243,7	2683,8	105
110	143,27	0,00105	1,209	1,2102	461,30	2230,2	2691,5	110
115	169,06	0,00106	1,036	1,0366	482,48	2216,5	2699,0	115

$$\frac{h_2 - h_1}{w_3 - w_1} = h_w = 2691,5 \frac{kJ}{kg}$$

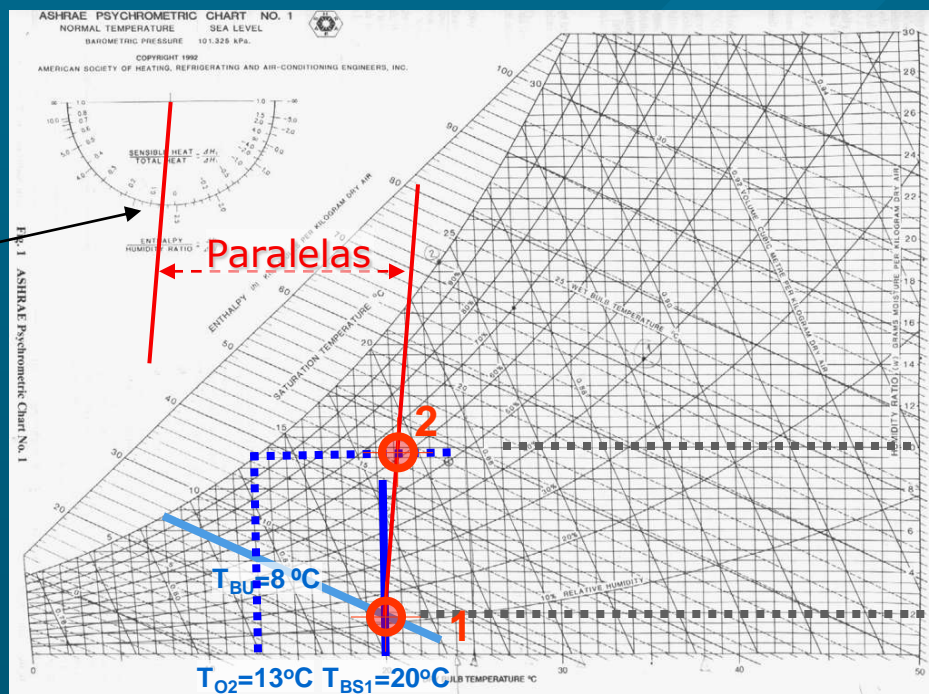
6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar

Exemplo

continuação

Com o auxílio do transferidor a inclinação da linha que representa o processo é obtida. O ponto 2 é plotado na intercessão da linha obtida com a linha de $T_o = 13^\circ \text{C}$. No ponto 2 temos então $T_{BS,2} = 20,2^\circ \text{C}$.

A escala externa do transferidor fornece $\Delta h / \Delta w = h_w$



Exemplo

continuação

A vazão de vapor d'água requerida para injeção é então obtida fazendo,

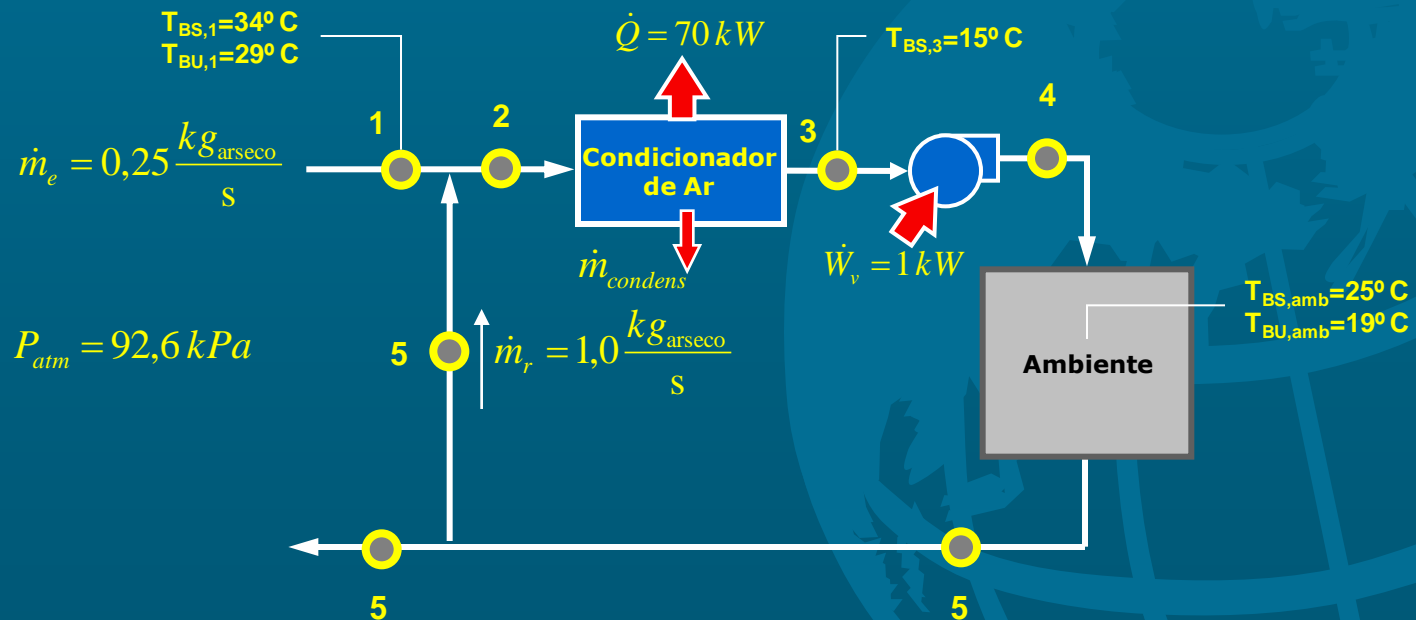
$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (w_2 - w_1)$$

$$\dot{m}_w = 100.60.(0,0094 - 0,0018)$$

$$\dot{m}_w = 45,6 \frac{kg}{h}$$

6. Processo Básicos de Condicionamento do Ar**Exemplo: Sistema de Ar Condicionado**

A figura abaixo ilustra esquematicamente um sistema de AC e suas variáveis operacionais. Despreze as perdas de calor nos dutos e represente todo o processo numa carta psicrométrica.



Exemplo: Sistema de Ar Condicionado continuação

Vamos examinar cada processo elementar separadamente.

a) Determinação do estado 2: após a mistura

$$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_e} = \frac{w_2 - w_1}{w_5 - w_2} \Rightarrow w_2 =$$

$$w_2 = \frac{0,25}{1,25} \cdot \left[0,0127 + 0,0260 \frac{1,0}{0,25} \right]$$

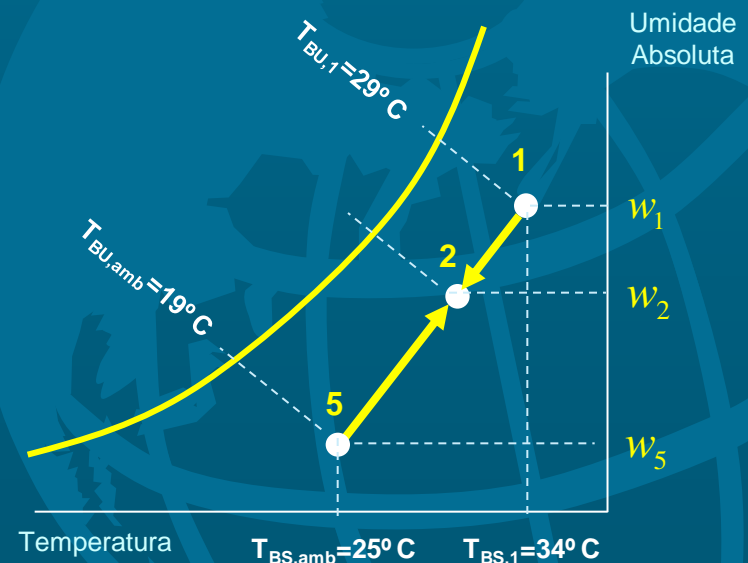
$$w_2 = 0,023 \text{ kg}_{\text{vapor d'água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$$

No ponto 2 então temos,

$$T_{BS,2} = 32,1^\circ \text{C}$$

$$\phi_2 = 70\%$$

$$h_2 = 92,1 \text{ kJ/kg}_{\text{ar seco}}$$



Exemplo: Sistema de Ar Condicionado continuação

Vamos examinar cada processo elementar separadamente.

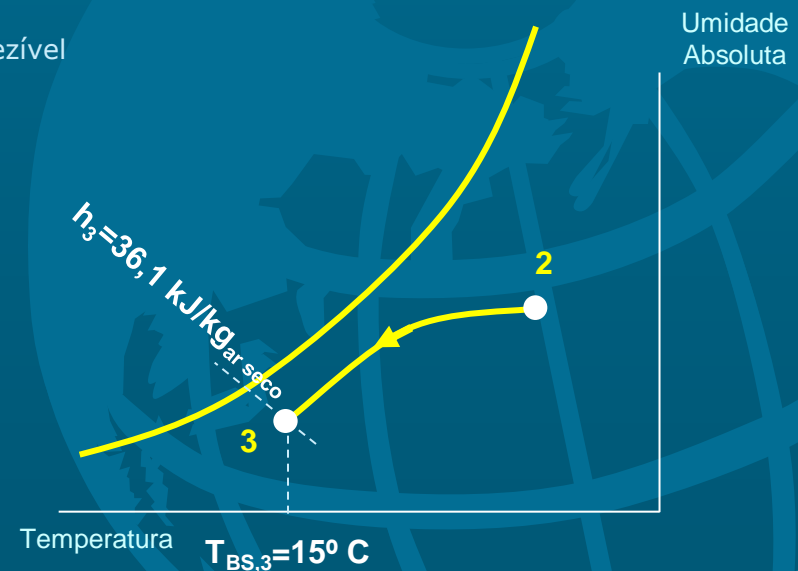
b) Determinação do estado 3: saída do condicionador de ar

$$h_3 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_r + \dot{m}_e} + h_2 - \underbrace{(w_3 - w_2) \cdot h_L}_{\text{desprezível}}$$

$$h_3 = \frac{-70}{1,25} + 92,1 = 36,1 \text{ kJ/kg}_{\text{ar seco}}$$

No ponto 3 então,

$$w_3 = 0,08307 \text{ kg}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$$



Exemplo: Sistema de Ar Condicionado
continuação

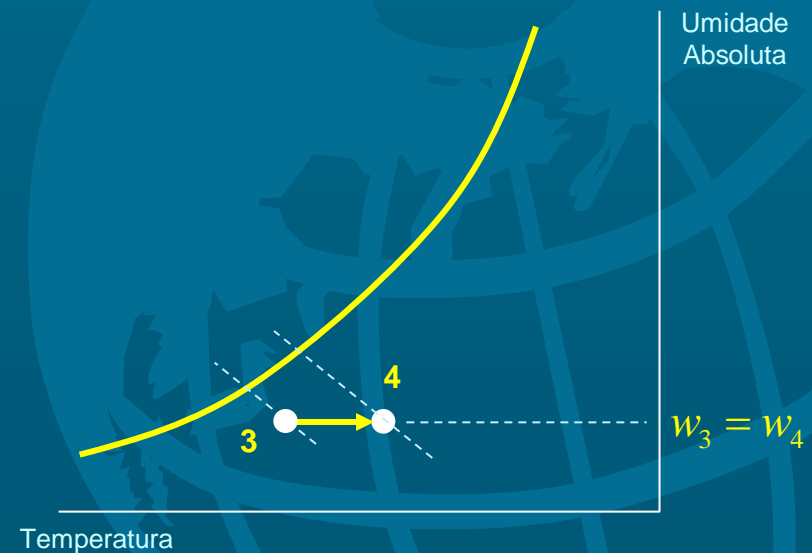
Vamos examinar cada processo elementar separadamente.

c) Determinação do estado 4: ar de insuflamento

Neste caso o ar sofre apenas aquecimento sensível devido a potência do ventilador, assim,

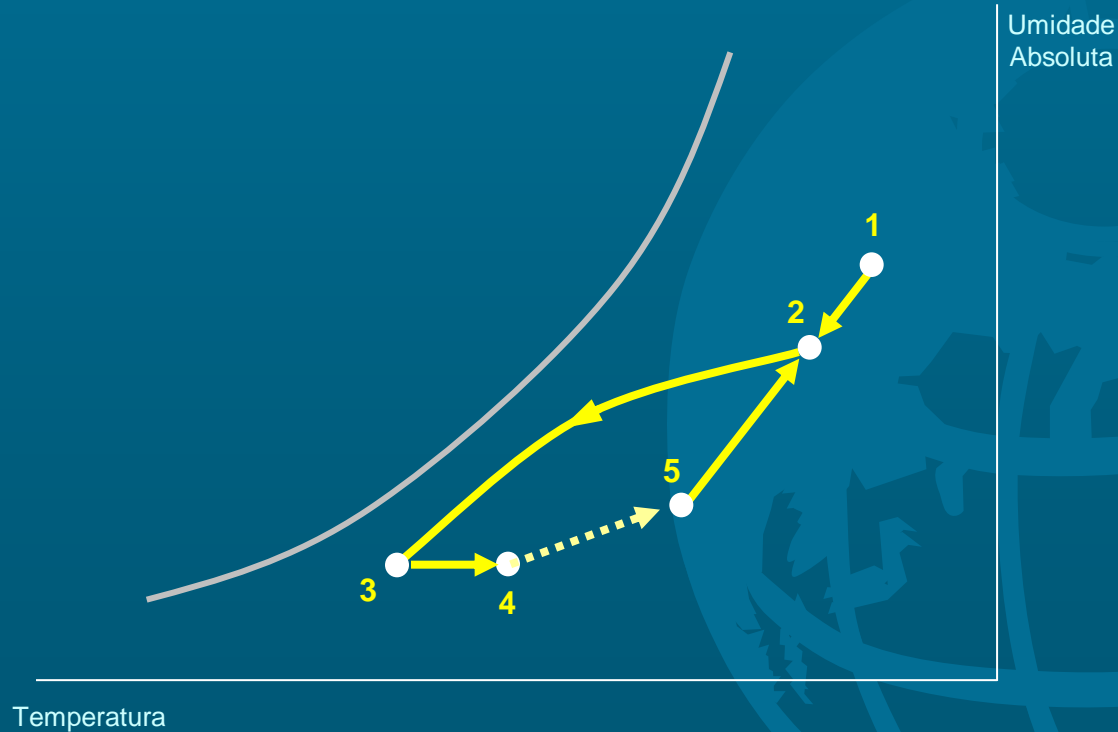
$$h_4 = \frac{\dot{W}_v}{\dot{m}_r + \dot{m}_e} + h_3$$

$$h_4 = \frac{1}{1,25} + 36,1 = 36,9 \text{ kJ/kg}_{ar \text{ seco}}$$



Exemplo: Sistema de Ar Condicionado
continuação

Finalmente, representamos todos os processos



Fim deste Capítulo